



**Universidade de Aveiro**  
**2015**

Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e  
Informática

**Pedro Miguel  
Dias**

**Convergência em Redes de Acesso de Nova Geração**





**Universidade de Aveiro**  
**2015**

Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e  
Informática

**Pedro Miguel  
Dias**

## **Convergência em Redes de Acesso de Nova Geração**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor Mário Lima (orientador) e do Doutor António Teixeira (coorientador), ambos do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática e do Instituto de Telecomunicações - Aveiro.



Dedico este trabalho aos meus pais e irmão.



## **O júri**

Presidente

**Prof. Doutor José Rodrigues Ferreira da Rocha**  
Professor catedrático da Universidade de Aveiro

Vogais

**Prof. Doutor Mário José Neves de Lima**  
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro (Orientador)

**Prof. Doutor António Luís Jesus Teixeira**  
Professor associado com agregação da Universidade de Aveiro (Co-Orientador)

**Prof. Doutor Paulo Sérgio de Brito André**  
Professor associado com agregação do Instituto Superior Técnico





## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer aos meus pais por todo o apoio prestado no meu percurso académico. A toda a família, amigos e colegas de trabalho por estarem sempre presentes.

Gostaria de agradecer também aos meus orientadores, Doutor Mário Lima e Doutor António Teixeira por toda a disponibilidade e ajuda na realização desta dissertação. Um agradecimento também ao Ali Shahpari pela ajuda no laboratório de redes óticas.

À Universidade de Aveiro, aos professores e alunos que de alguma forma fizeram parte desta jornada.



**Palavras-chave**

G-PON, XG-PON, TWDM-PON, UDWDM-PON, Detecção coerente, EVM.

**Resumo**

Devido ao contínuo crescimento da necessidade de uma maior largura de banda, surgiram as redes óticas passivas (PON – Passive Optical Network). Passando pela G-PON (Gigabit-PON), XG-PON (10 Gigabit PON) e TWDM-PON (Time Wavelength Division Multiplexing PON), continuam a ser feitos estudos de redes óticas passivas que possam cumprir os requisitos de largura de banda no futuro, como é o caso da UDWDM-PON (Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing PON).

Nesta dissertação são estudadas as tecnologias acima referidas, descrevendo as principais características das tecnologias já existentes. É também efetuado um estudo individual a cada uma das tecnologias em termos de sensibilidade. São também estudados cenários de coexistência, analisando o impacto da aproximação da UDWDM-PON às restantes tecnologias.



**Keywords**

G-PON, XG-PON, TWDM-PON, UDWDM, Coherent detection, EVM

**Abstract**

Due to the continuous growth of bandwidth need, passive optical networks (PONs) emerged. From the Gigabit-PON (G-PON), 10 Gigabit-PON (XG-PON) and Time Wavelength Division Multiplexing PON (TWDM-PON), they still being made studies on passive optical networks that can meet the bandwidth requirements of the future, such as the Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing PON (UDWDM-PON).

In this thesis, the mentioned technologies are studied, describing the main features of the existing ones. It is also made an individual study for each technology in terms of sensitivity. Also, it is made a study on coexistence scenarios, by analysing the impact of the other technologies on UDWDM-PON.

.



# Índice

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS .....</b>	<b>VII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ESTRUTURA .....	2
1.4. CONTRIBUIÇÕES .....	3
<b>2. ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>5</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	5
2.2. PON-PASSIVE OPTICAL NETWORK.....	6
2.2.1. Arquitetura .....	6
2.3. GIGABIT-CAPABLE PON (G-PON) .....	7
2.3.1. Arquitetura .....	7
2.3.2. Ritmo de transmissão .....	7
2.3.3. Alcance .....	8
2.3.4. Divisor passivo .....	8
2.3.5. Planos de comprimento de onda .....	8
2.3.6. Código de Linha .....	8
2.3.7. Código de correção de erros.....	8
2.4. 10-GIGABIT-CAPABLE PON (XG-PON) .....	8
2.4.1. Arquitetura .....	9
2.4.2. Planos de comprimento de onda .....	9
2.4.3. Ritmo de transmissão .....	9
2.4.4. Distância de Fibra .....	9
2.4.5. Divisor passivo.....	10
2.4.6. Código corretor de erros.....	10
2.4.7. Código de linha .....	10
2.5. NEXT GENERATION PON 2 (NG-PON2) .....	10
2.6. TWDM-PON .....	11
2.6.1. Arquitetura .....	12
2.6.2. Plano de comprimentos de onda .....	13
2.6.3. Alcance .....	14
2.6.4. Código de linha .....	15
2.7. UDWDM-PON .....	15

2.7.1.	<i>Formatos de Modulação</i>	16
2.7.2.	<i>Deteção Coerente</i>	17
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS DE SIMULAÇÃO</b>	<b>21</b>
3.1.	G-PON	21
3.2.	XG-PON	23
3.3.	TWDM-PON	25
3.4.	UDWDM-PON	28
3.4.1.	<i>16 Canais QPSK</i>	29
3.4.2.	<i>16 Canais 16-QAM</i>	30
3.4.3.	<i>Cenário experimental</i>	31
<b>4.</b>	<b>CENÁRIOS DE COEXISTÊNCIA</b>	<b>35</b>
4.1.	UDWDM-PON ADJACENTE À G-PON	36
4.2.	UDWDM-PON ADJACENTE À XG-PON	37
4.3.	UDWDM-PON ADJACENTE À TWDM-PON	39
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO</b>	<b>41</b>
5.1.	CONCLUSÕES	41
5.2.	TRABALHO FUTURO	42
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>43</b>
<b>ANEXO A</b>		<b>47</b>
	MEDIDAS DE QUALIDADE DE UM SINAL ÓTICO	47
	<i>Error Vetor Magnitude (EVM)</i>	47



# Lista de Figuras

Figura 1 – Crescimento dos utilizadores de internet a nível mundial [1].....	1
Figura 2 - Arquitetura de uma rede TDM-PON [8] .....	6
Figura 3 - Arquiteturas da tecnologia G-PON [13] .....	7
Figura 4 - Cenários suportados pela XG-PON[17] .....	9
Figura 5 - Diagrama da arquitetura TWDM-PON[25].....	12
Figura 6 – Variação da atenuação e dispersão cromática numa fibra SMF [24].....	13
Figura 7 - Planos de comprimento de onda das tecnologias anteriores a NG-PON2[24]. .....	14
Figura 8 - Conceito de uma rede UDWDM [28].....	15
Figura 9 - Diagrama de blocos de um transmissor NRZ [30] .....	16
Figura 10 - Arquitetura de um modulador IQ [31].....	17
Figura 11 - Recetor coerente homodino [32] .....	18
Figura 12 - Diagrama de blocos de um recetor digital coerente [34] .....	20
Figura 13 - Diagrama de blocos sistema G-PON .....	21
Figura 14 - Taxa de erros da tecnologia G-PON em função da potência ótica recebida.....	22
Figura 15- Diagrama de blocos do sistema XG-PON .....	23
Figura 16-Taxa de erros em função da potência ótica recebida no sentido downstream da XG-PON .....	24
Figura 17- Comparação da taxa de erros entre o sentido downstream e upstream na XG-PON.....	25
Figura 18- Esquema do transmissor e recetor TWDM.....	26
Figura 19-Taxa de erros do sistema TWDM no sentido downstream em B2B.....	27
Figura 20 – Comparação da taxa de erros do sistema TWDM no sentido downstream em B2B e com fibra .....	27
Figura 21 - TWDM upstream, estudo sem fibra e fibra de 60 Km .....	28
Figura 22 - Diagrama de blocos do sistema UDWDM .....	28
Figura 23 - EVM UDWDM 16 canais QPSK .....	29
Figura 24- EVM sistema UDWDM 16canais 16-QAM.....	30
Figura 25 - Espetro dos sinais transmitidos .....	31
Figura 26 - Interface da ferramenta OCR.....	32
Figura 27 - Diagrama de blocos da ferramenta OCR.....	32
Figura 28 - Taxa de erros em função da potência ótica recebida .....	33
Figura 29 – EVM em função da potência ótica recebida .....	33
Figura 30- Diagrama de blocos do cenário de coexistência .....	35
Figura 31 - Plano de comprimentos de onda com UDWDM adjacente à G-PON .....	36

Figura 32 - Variação do EVM relativamente ao espaçamento $\Delta f$ .....	36
Figura 33 - Relação do EVM com a potência ótica recebida para diferentes valores de $\Delta f$ .....	37
Figura 34 - Plano de comprimentos de onda com UDWDM adjacente à XG-PON .....	37
Figura 35 - Variação do EVM com o espaçamento $\Delta f$ , colocando o UDWM adjacente à XG-PON .....	38
Figura 36 - Variação do EVM com a potência ótica recebida para diferentes espaçamentos $\Delta f$ .....	38
Figura 37 - Plano de comprimentos de onda com UDWDM adjacente à TWDM-PON .....	39
Figura 38 - Constelação 16-QAM com vetor de erro [39] .....	47
Figura 39 - Relação entre BER e EVM, medições (símbolos), simulações (tracejado), teórico (linhas) [38].....	48

## Lista de tabelas

Tabela 1 - Planos de comprimento de onda para NG-PON2 [27].....	14
Tabela 2 - Parâmetros da fibra utilizada nas simulações.....	21
Tabela 3- Parâmetros de simulação do sistema G-PON.....	22
Tabela 4 - Parâmetros de simulação do sistema XG-PON.....	24
Tabela 5- Parâmetros de simulação do sistema TWDM .....	26
Tabela 6 - Parâmetros do sistema UDWDM QPSK.....	29
Tabela 7 - Paramentos do sistema UDWDM 16-QAM .....	30



# Lista de Acrónimos

<b>ATM</b>	Asynchronous Transfer Mode
<b>AWG</b>	Array Waveguide Grating
<b>B2B</b>	Back-to-Back
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BPON</b>	Broadband PON
<b>CO</b>	Central Office
<b>CW</b>	Continuous Wave
<b>DBA</b>	Dynamic Bandwidth Allocation
<b>DSP</b>	Digital Signal Processing
<b>EDFA</b>	Erbium Doped Fiber Amplifier
<b>EFM</b>	Ethernet in the First Mile
<b>EPON</b>	Ethernet Passive Optical Network
<b>EVM</b>	Error Vector Magnitude
<b>FEC</b>	Forward Error Correction
<b>FTL</b>	Fiber In The Loop
<b>FSAN</b>	Full Service Access Network
<b>FTTB</b>	Fiber to the Building
<b>FTTC</b>	Fiber to the Curb
<b>FTTCab</b>	Fiber to the Cabinet
<b>FTTH</b>	Fiber to the Home
<b>FTTx</b>	Fiber to the x
<b>G-PON</b>	Gigabit Passive Optical Network
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>ITU-T</b>	International Telecommunication Union-Telecommunication
<b>LO</b>	Local Oscillator
<b>MZM</b>	Mach – Zehnder Modulator
<b>NRZ</b>	Non Return to Zero
<b>NG-PON</b>	Next Generation Passive Optical Network
<b>OAN</b>	Optical Access Network
<b>OAs</b>	Optical Amplifiers

<b>ODN</b>	Optical Distribution Network
<b>OFDM-PON</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing PON
<b>OLT</b>	Optical Line Termination
<b>ONT</b>	Optical Network Termination
<b>ONU</b>	Optical Network Unit
<b>OOK</b>	On-Off Keying
<b>P2MP</b>	Point-to-Multipoint
<b>PBS</b>	Polarization Beam Splitter
<b>PCT</b>	Paired Channel Technology
<b>PON</b>	Passive Optical Network
<b>PSK</b>	Phase Shift Keying
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase Shift Keying
<b>RF</b>	Radio Frequency
<b>RS</b>	Reed-Solomon
<b>RZ</b>	Return to Zero
<b>SiP</b>	Silicon Photonics
<b>SMF</b>	Single Mode Fiber
<b>SOA</b>	Semiconductor Optical Amplifier
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>TDM-PON</b>	Time-Division Multiplexing Passive Optical Network
<b>TWDM-PON</b>	Time Wavelength Division Multiplexing PON
<b>UDWDM</b>	Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplex
<b>XG-PON</b>	10-Gigabit-capable PON

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

Cada vez mais a internet faz parte das nossas vidas, redes sociais, vídeo-online, jogos-online, entre outros serviços levaram ao crescimento do número de utilizadores de internet. Como se pode observar na Figura 1, têm-se vindo a verificar ao longo dos anos um crescimento no número de utilizadores de Internet, sendo que atualmente esse número já ultrapassa os 3 mil milhões [1]. Apesar de muitos utilizadores acederem à internet através das redes móveis, grande maioria continua a aceder através dos serviços de internet nas suas casas. Este crescimento dos utilizadores de internet levou ao aumento da necessidade de largura de banda nas redes de acesso.

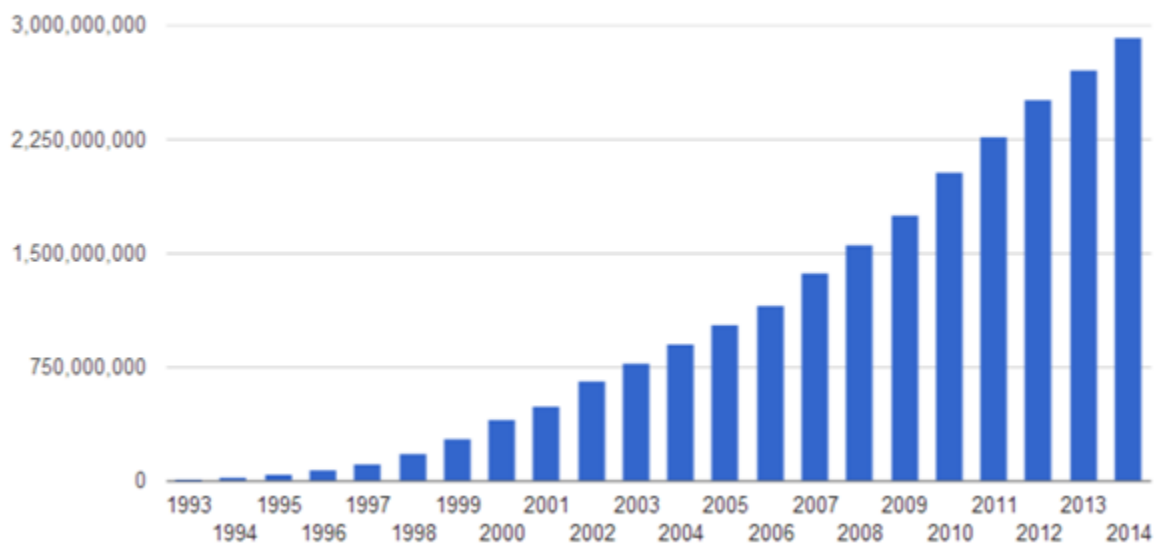


Figura 1 – Crescimento dos utilizadores de internet a nível mundial [1]

Devido à sua elevada largura de banda e baixa atenuação, as fibras óticas têm sido instaladas por toda a parte [2]. Devido à arquitetura de rede ótica passiva, a fibra ótica tornou-se uma solução atrativa para a necessidade de largura de banda. Nos últimos anos diversas redes óticas passivas (PON-Passive Optical Network) têm vindo a ser estudadas pela indústria de telecomunicações, tendo diversas normas sido aprovadas pela ITU-T [3] (International Telecommunication Union-Telecommunication), e pelo IEEE [4] (Institute of

Electrical and Electronics Engineers). Foi então que a chamada fibra-para-a-vizinhança (FTTx-Fiber-to-the-x), se tornou uma direta concorrente das redes em fios de cobre.

No entanto as tecnologias existentes deixarão de satisfazer a necessidade de largura de banda no futuro, e por isso continua-se a estudar as redes óticas passivas de próxima geração (NG-PON, Next Generation PON), que permitam uma maior largura de banda.

O ITU-T e o FSAN [5] (Full Service Access Network), dividem as NG-PON em duas categorias, para médio e longo prazo respetivamente NG-PON1 e NG-PON2. Em NG-PON1 encontra-se a XG-PON (10 Gigabit PON), e em NG-PON2 várias tecnologias como o TWDM-PON (Time and Wavelength Division Multiplexing PON), WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing PON) e UDWDM-PON (Ultra Dense WDM-PON).

## **1.2. Objetivos**

A presente dissertação tem como principais objetivos:

- Estudo de diversas tecnologias PON e respetivas normas: G-PON, XG-PON, TWDM-PON, UDWDM-PON;
- Caracterização das tecnologias G-PON, XG-PON, TWDM-PON e UDWDM-PON isoladamente no simulador VPIphotonics [6]. No último caso, UDWDM-PON é também efetuada análise experimental;
- Estudo de cenários de coexistência.

## **1.3. Estrutura**

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos:

- Introdução;
- Estado da Arte;
- Resultados de simulação;
- Simulação de cenários de coexistência;
- Conclusões e trabalho futuro.

Neste capítulo é feito o enquadramento, apresentação dos objetivos e a estrutura da dissertação e apresentadas as contribuições para o trabalho.



No segundo capítulo é feita uma breve introdução às tecnologias PON, assim como o estudo da evolução das tecnologias PON e apresentadas algumas das suas principais características. São também abordados os temas de formatos de modulação avançados e detecção coerente.

No terceiro capítulo são apresentadas as simulações efetuadas com o simulador VPI com a finalidade de caracterizar cada uma das diversas tecnologias PON.

No quarto capítulo são estudados cenários de coexistência colocando a UWDM-PON próxima das diversas tecnologias e analisado o impacto da aproximação da UDWDM-PON a outras tecnologias.

Finalmente no quinto capítulo são feitas as conclusões ao trabalho efetuado assim como apresentados possíveis trabalhos futuros na área.

## **1.4. Contribuições**

As principais contribuições do trabalho são:

- Estudo da evolução das PONs e descrição das principais características das tecnologias G-PON, XG-PON, TWDM-PON e UDWDM-PON;
- Análise do desempenho (BER- Bit Error Rate) das tecnologias G-PON, XG-PON, TWDM-PON e UDWDM-PON em função da potência ótica recebida;
- Estudo de cenários de coexistência da tecnologia UDWM-PON com as tecnologias G-PON, XG-PON e TWDM-PON.



## 2. Estado da Arte

### 2.1. Introdução

O estudo de FITL (Fiber-in-the-loop) começou nos anos oitenta, também referidos como FTTx onde x pode ser “home”, “curb”, etc., dependendo de quão perto a fibra se encontra perto do utilizador [7]. A uniformização das PON começou em 1990s, quando as operadoras anteciparam um crescimento na necessidade da largura de banda. Em 1995, a FSAN foi formada por diversas operadoras de telecomunicações com o objetivo de desenvolver redes de acesso em fibra.

Devido às capacidades de manipulação de tráfego e uma robusta QoS (Quality of service) suportados por ATM (Asynchronous Transfer Mode), surgiu a primeira PON, ATM-PON, ou simplesmente APON. Suportando transmissão de 622.08 Mbps downstream e 155.52 Mbps upstream, e usando os comprimentos de onda 1490 nm para downstream de dados e voz, e 1310 nm para upstream. Todo o tráfego do utilizador é encapsulado nas células ATM, que consistem num cabeçalho de controlo de 5 bytes e 48 bytes de dados [8].

A APON foi retificada pelo ITU-T, surgindo em 1998 a recomendação G.983.1 [9]. Baseando-se na APON, o ITU-T desenvolveu a BPON (Broadband PON) surgindo a série de especificações G.983, sendo a BPON especificada com um ritmo de dados superior e protocolos de controlo detalhados [10], suportando um ritmo de downstream de 1.2 Gbps e 622 Mbps upstream e especificando uma alocação de banda dinâmica (DBA-Dynamic Bandwidth Allocation).

Em 2001, o grupo IEEE 802.3 [11] começou o projeto 802.3ah EFM (Ethernet in the First Mile) [12], sendo retificado em 2004, ficando conhecida como EPON (Ethernet PON), especificando um ritmo de transmissão downstream e upstream de 1 Gbps, e uma distância de 10 ou 20 km.

A contínua procura por uma largura de banda superior, estimulou o desenvolvimento de redes de acesso com maior capacidade. O grupo FSAN desenvolveu a G-PON (Gigabit-capable PON), dando origem em 2003 à recomendação ITU-T G.984.1 [13], suportando ritmos máximos downstream/upstream de 2.488 Gbps.

## 2.2. PON-Passive Optical Network

Comparando com as tradicionais redes de cabos as redes de fibra ótica oferecem uma largura de banda virtualmente ilimitada (da ordem de THz de banda disponível) [14]. Como o nome implica uma rede ótica passiva, não contém elementos ativos entre o edifício central (CO – Central Office) e as instalações locais. No CO encontra-se a OLT (Optical Line Terminal) e junto dos utilizadores várias ONUs (Optical Network Units) ou ONTs (Optical Network Termination). A OLT e as ONUs são conectadas através de fibra e elementos passivos constituindo a ODN (Optical Distribution Network) [2]. Por forma a evitar colisões, a transmissão upstream usa um protocolo de múltiplo acesso (TDMA- Time Division Multiple Access) por forma a atribuir intervalos de tempo a cada utilizador. Por esse motivo este tipo de redes óticas são chamadas de TDM-PON (Time Division Multiplexing PON)[8].

### 2.2.1. Arquitetura

Uma rede ótica passiva apresenta uma arquitetura ponto para multiponto (P2MP – Point-to-Multipoint), podendo as suas arquiteturas ser do tipo: FTTH (Fiber to the Home) em que a fibra chega até à casa do utilizador, FTTB/C (Fiber to the Building/Curb) onde a fibra vai até ao edifício do utilizador e FTTCab (Fiber to the Cabinet) na qual a fibra chega até as cabines. Na Figura 2 é apresentada a típica arquitetura de uma TDM-PON.

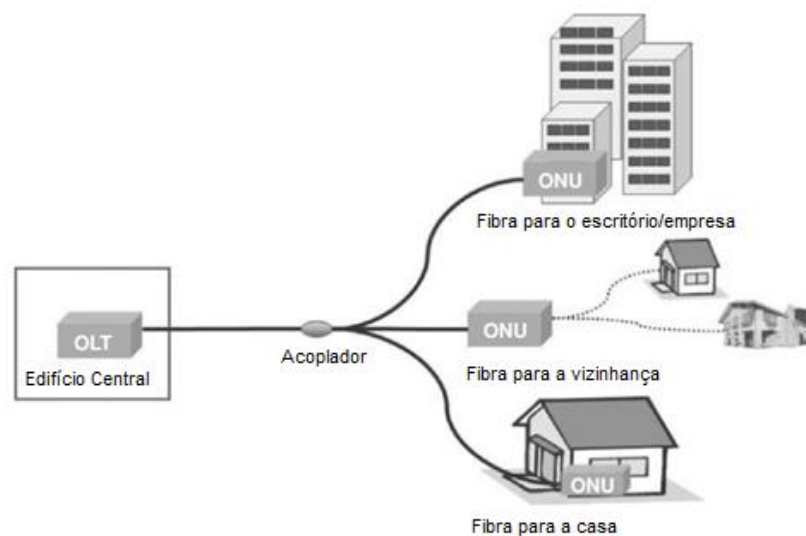


Figura 2 - Arquitetura de uma rede TDM-PON [8]

## 2.3. Gigabit-capable PON (G-PON)

A G-PON surgiu em 2003 com a recomendação G.984.1 [13] do ITU-T descrevendo uma rede ótica de acesso flexível capaz de suportar os requisitos de largura de banda de serviços residenciais e empresariais.

### 2.3.1. Arquitetura

As arquiteturas da G-PON são apresentadas na Figura 3, onde a rede de acesso ótico (OAN – Optical Access Network), é comum às diferentes arquiteturas [13].

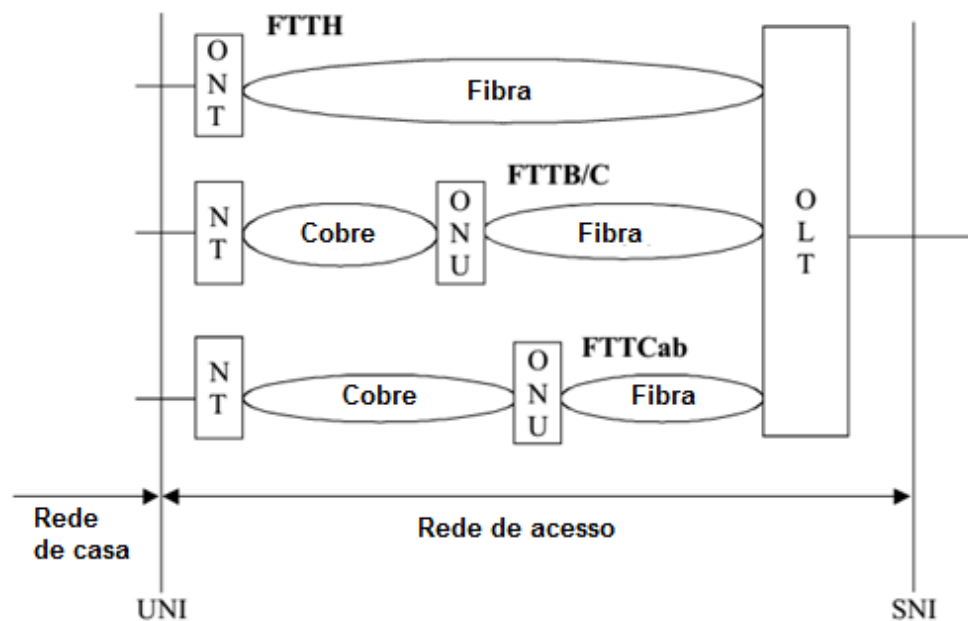


Figura 3 - Arquiteturas da tecnologia G-PON [13]

### 2.3.2. Ritmo de transmissão

A G-PON tem como objetivo ritmos superiores ou iguais a 1.2 Gbit/s, sendo identificados os ritmos de transmissão [13]:

- 155 Mbit/s upstream, 1.2 Gbit/s downstream;
- 622 Mbit/s upstream, 1.2 Gbit/s downstream.
- 1.2 Gbit/s upstream, 1.2 Gbit/s downstream;
- 155 Mbit/s upstream, 2.4 Gbit/s downstream;
- 622 Mbit/s upstream, 2.4 Gbit/s downstream;
- 1.2 Gbit/s upstream, 2.4 Gbit/s downstream;
- 2.4 Gbit/s upstream, 2.4 Gbit/s downstream;

### **2.3.3. Alcance**

O alcance lógico corresponde à máxima distância entre a ONU/ONT e a OLT com a exceção da limitação na casada física. Na G-PON, a distância logica máxima está definida como 60 km [13]-

O alcance físico é a máxima distância física entre a ONU/ONT e a OLT. Na G-PON encontram-se definidas duas opções para o alcance físico: 10 km e 20 km [13].

### **2.3.4. Divisor passivo**

Quanto maior o número de divisões, mais atrativo será o G-PON para os operadores, no entanto um número de divisões elevado implica a necessidade de um aumento do balanço de potência. Foi definido uma divisão de 1:64 [13].

### **2.3.5. Planos de comprimento de onda**

O plano de comprimento de onda para a G-PON no sentido downstream está definido entre 1480-1500 nm. No sentido upstream o comprimento de onda é entre 1260-1360 nm [15].

### **2.3.6. Código de Linha**

Ambos os sentidos, downstream e upstream utilizam o código de linha NRZ (Non-Return-to-Zero) com embaralhamento [15].

### **2.3.7. Código de correção de erros**

Na G-PON pode ser ativada a utilização de correção de erros do tipo FEC (Forward Error Correction), a codificação introduz redundância, o que permite ao decodificador detetar e corrigir erros de transmissão. A recomendação G.984.3 [16] define a utilização do código Reed-Solomon (RS) RS (255,239), consistindo em 255 bytes codificados, sendo 239 de dados e 16 bytes de redundância.

## **2.4. 10-Gigabit-capable PON (XG-PON)**

A XG-PON surgiu em 2010 com a recomendação G.987 [17].

### 2.4.1. Arquitetura

A arquitetura da XG-PON é semelhante à da G-PON (Figura 3), suportando os cenários apresentados na Figura 4.

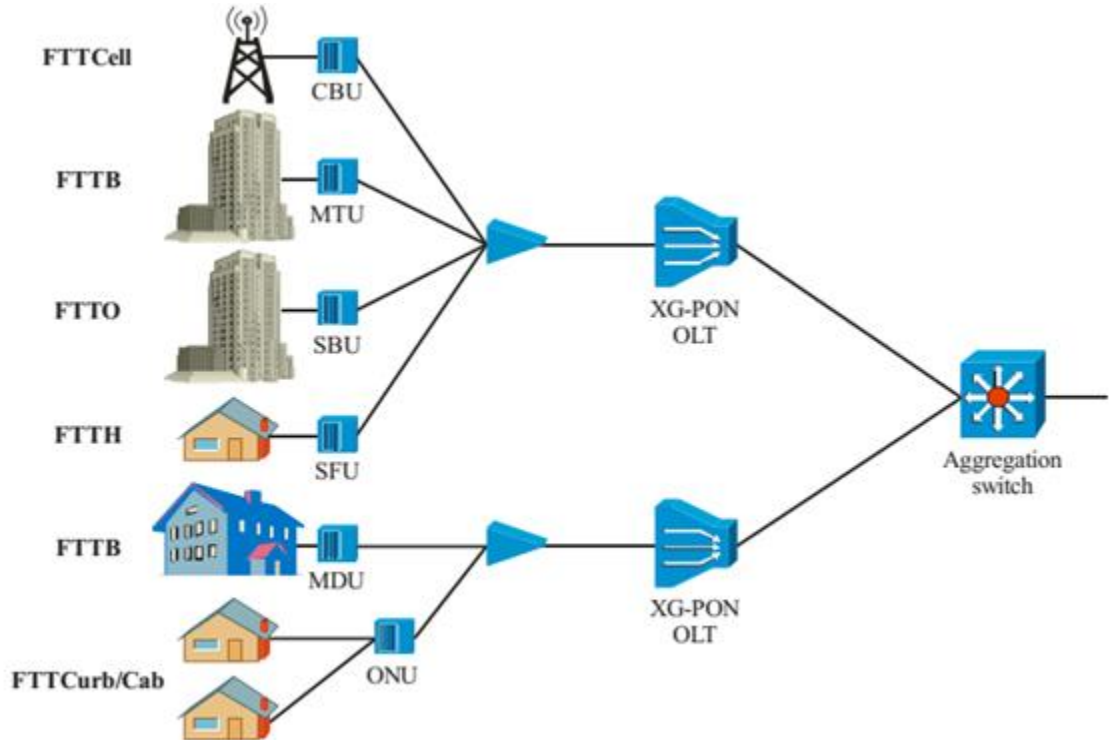


Figura 4 - Cenários suportados pela XG-PON[17]

### 2.4.2. Planos de comprimento de onda

O comprimento de onda do sinal de downstream da XG-PON é entre 1575 nm e 1580 nm, e para o sinal de upstream de 1260-1280 nm [17].

### 2.4.3. Ritmo de transmissão

A XG-PON identifica dois conjuntos de ritmo de transmissão [18]:

- XG-PON1: 10 Gbit/s downstream, 2.5 Gbit/s upstream;
- XG-PON2: 10 Gbit/s downstream, 10 Gbit/s upstream.

### 2.4.4. Distância de Fibra

A recomendação ITU-T G.987 [18] introduz o conceito de distância de fibra. XG-PON1 suporta a máxima distância de fibra de 20 km, no entanto a camada TC deverá suportar a distância máxima de 60 km [17].

#### **2.4.5. Divisor passivo**

Uma vez que as operadoras construíram as infraestruturas de ODN com divisões de 1:32 e 1:64 para as Gigabit PONs, 1:64 é o requisito mínimo para a XG-PON por forma a permitir coexistência [17]. No entanto as operadoras têm o interesse de aumentar o divisor para além de 1:64, por exemplo 1:128 até 1:256.

#### **2.4.6. Código corretor de erros**

Correção de erros do tipo FEC é obrigatória no sentido downstream assim como em upstream. No sentido downstream é usado o código RS (248,216), em que a palavra codificada é composta por 248 bytes, sendo 216 bytes de dados seguidos por 32 bytes de paridade. Para o upstream é usado o código RS (248,232), sendo 232 bytes de dados e 16 bytes de paridade, compondo a palavra codificada de 248 bytes [19].

#### **2.4.7. Código de linha**

A XG-PON usa o código de linha NRZ em ambos os sentidos com embaralhamento [20].

### **2.5. Next Generation PON 2 (NG-PON2)**

Após o projeto XG-PON, começou o estudo da NG-PON2, com requisitos iniciais de um ritmo de pelo menos 40 Gbit/s e 40 km de alcance para um divisor de 1:64, porém sem a necessidade de compatibilidade com a ODN existente, nem com as tecnologias PON anteriores [21]. Baseando-se nestes requisitos foram propostas diversas tecnologias, incluindo:

- TWDM-PON;
- WDM-PON;
- OFDM-PON (Orthogonal Frequency Division Multiplexing PON);
- UDWDM-PON.

Uma vez que alguns sistemas permitiam a compatibilidade com a ODN existente e outros não, o grupo FSAN reconsiderou os requisitos para NG-PON2. A possibilidade de operar na ODN existente foi o primeiro requisito, assim como a compatibilidade com sobreposição de vídeo [21]. Em pouco tempo todas as atenções se viraram para a



TWDM-PON, acabando por ser seleccionada em Abril de 2012 como tecnologia para NG-PON2 [22], uma vez que do ponto de vista das operadoras foi considerada menos ariscada, menos prejudicial e com custos inferiores às outras soluções [23].

## 2.6. TWDM-PON

Após a escolha da TWDM-PON como tecnologia para NG-PON2, em 2013 a ITU-T lançou a recomendação G.981.1 [24] apresentando os seus requisitos, incluindo:

- Uma arquitetura de múltiplos canais TWDM;
- 4 a 8 pares de canais TWDM;
- Ritmo por canal para downstream e upstream:
  - 10 Gbit/s downstream e 10 Gbit/s upstream;
  - 10 Gbit/s downstream e 2.5 Gbit/s upstream;
  - 2.5 Gbit/s downstream e 2.5 Gbit/s upstream.
- Alcance passivo de fibra de 40 km;
- Capacidade de alcançar 60 km;
- Suporte para um divisor passivo de 1:256.

Os sistemas NG-PON2 devem ainda incluir flexibilidade por forma a equilibrar variações de ritmos, distância e *split ratio* [24]:

- Capacidade para 40 Gbit/s downstream e alcance de 20 km para um divisor de pelo menos 1:64;
- Capacidade para 10 Gbit/s upstream e alcance de 20 km para um divisor de pelo menos 1:64;
- Acesso a taxas de pico de 10/2.5 Gbit/s para downstream/upstream;
- Distâncias superiores com divisor inferior devem também ser possíveis.

Para além disso os sistemas NG-PON2 devem ainda incluir [24]:

- Capacidade para 40 Gbit/s upstream com 10 Gbit/s por canal e um alcance de 20 km para um divisor de pelo menos 1:64;
- 2.5 Gbit/s por canal de downstream e 2.5 Gbit/s por canal upstream com alcance de 40 km e um divisor de 1:32;
- 10 Gbit/s por canal downstream e 10 Gbit/s por canal upstream com alcance de 40 km e um divisor de 1:32;

- Acesso a taxas de pico de 10/10 Gbit/s downstream/upstream;
- WDM sintonizável ponto-a-ponto com a capacidade de coexistir com outros sistemas PON.

### 2.6.1. Arquitetura

Ao contrário das tecnologias anteriores que usavam TDM, a tecnologia TWDM-PON, introduz múltiplos comprimentos de onda (WDM).

Na Figura 5 é apresentado um diagrama da arquitetura da TWDM-PON.

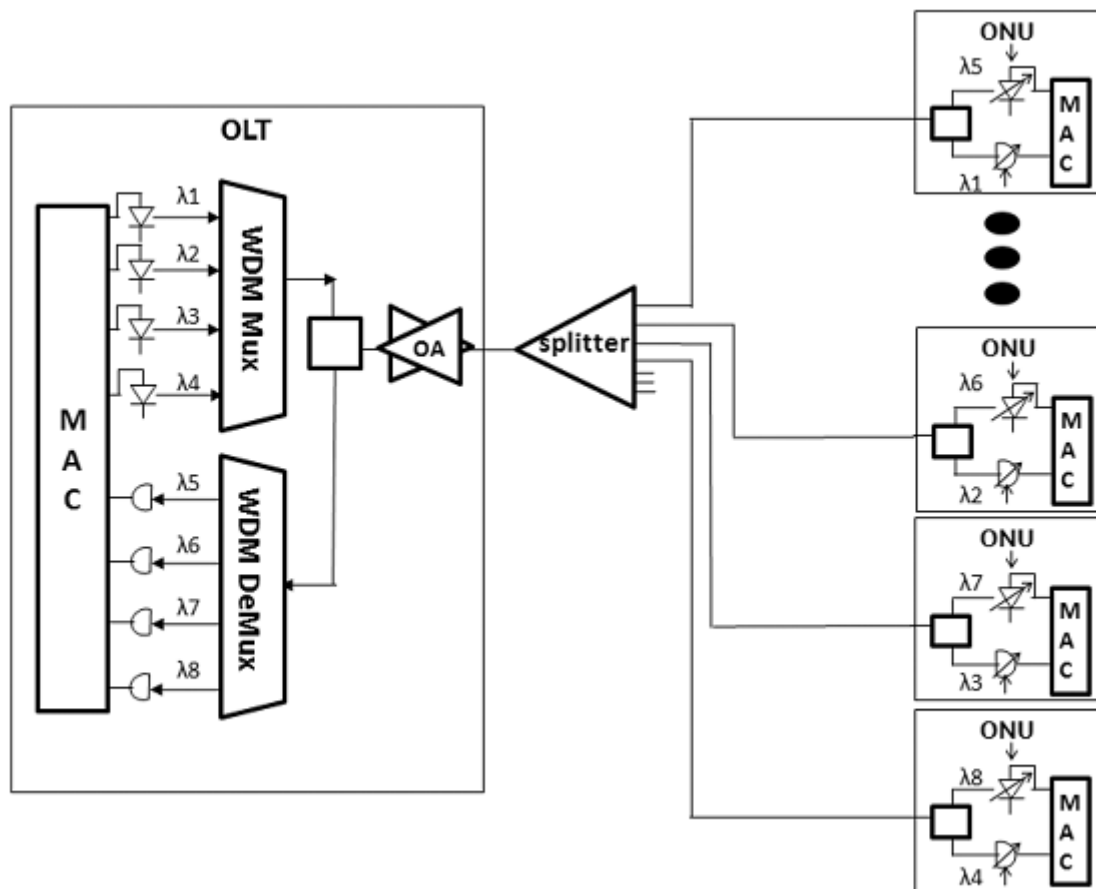


Figura 5 - Diagrama da arquitetura TWDM-PON[25]

Quatro XG-PONs são empilhadas usando 4 pares de comprimento de onda (  $\{\lambda_1, \lambda_5\}$ ,  $\{\lambda_2, \lambda_6\}$ ,  $\{\lambda_3, \lambda_7\}$ ,  $\{\lambda_4, \lambda_8\}$  ) [25]. Por forma a obter um balanço de potência superior ao da XG-PON, são usados amplificadores óticos (OAs- Optical Amplifiers) na OLT por forma a amplificar o sinal de downstream e pré-amplificar o sinal de upstream [22].

Para implementação de uma rede simples fins de manuseamento, as ONUs utilizam transmissores e recetores sintonizáveis incolores [22].

Para além disso do lado da OLT, existe o multiplexador por formar a multiplexar os diferentes XG-PONs e o demultiplexador para isolar cada comprimento de onda vindo das ONUs, implementados através de AWG (Array Waveguide Grating) [26].

### 2.6.2. Plano de comprimentos de onda

As redes de acesso utilizam em grande parte fibras de modo único (SMFs- Single Mode Fibers), dependendo as suas características do comprimento de onda. A Figura 6 mostra a variação da atenuação e da dispersão cromática com o comprimento de onda.

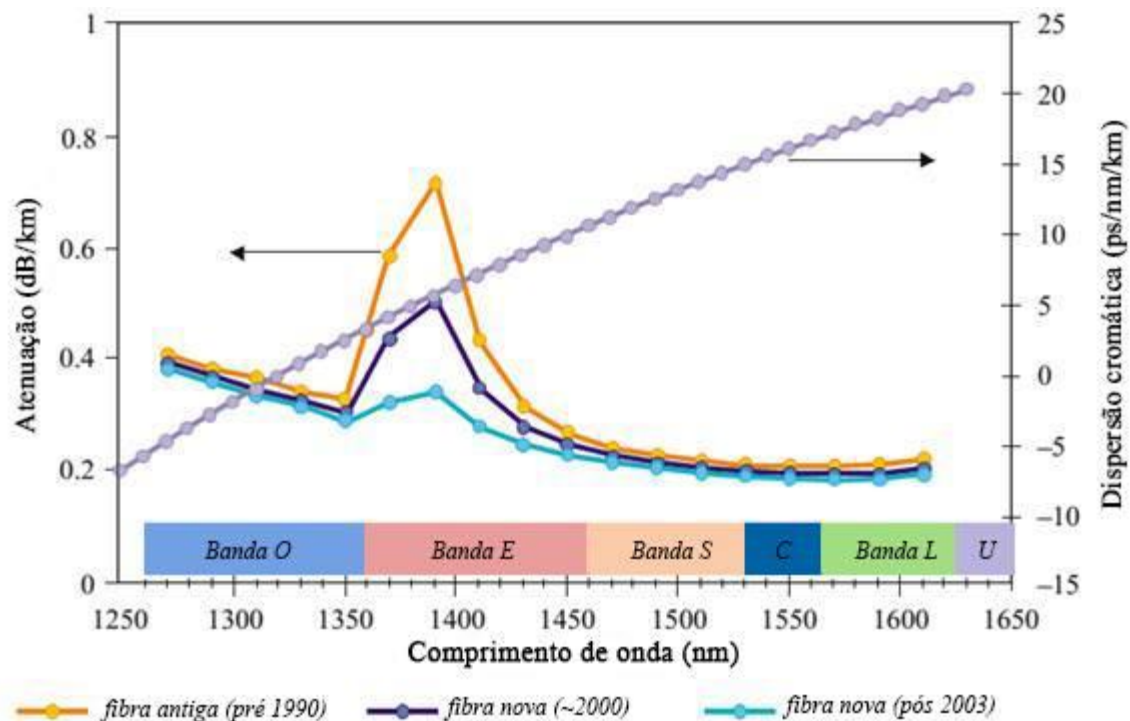


Figura 6 – Variação da atenuação e dispersão cromática numa fibra SMF [24]

A atenuação de um sinal ótico é mais baixa na banda C e L. E a dispersão cromática, que limita o alcance à medida que o ritmo aumenta também depende do comprimento de onda, com o valor zero para ~1310 nm [24]. Outro aspeto tido em conta para a escolha dos comprimentos de onda é a disponibilidade de amplificadores dopados com Érbio (EDFAs- Erbium Doped Fiber Amplifiers) que operam na banda C e L, enquanto os amplificadores óticos semicondutores (SOAs- Semiconductor Optical Amplifiers) podem funcionar em qualquer banda [24].

Daí surgiu a necessidade de considerar a coexistência dos planos de comprimentos de onda para NG-PON2 com os planos das PON existentes (Figura 7).

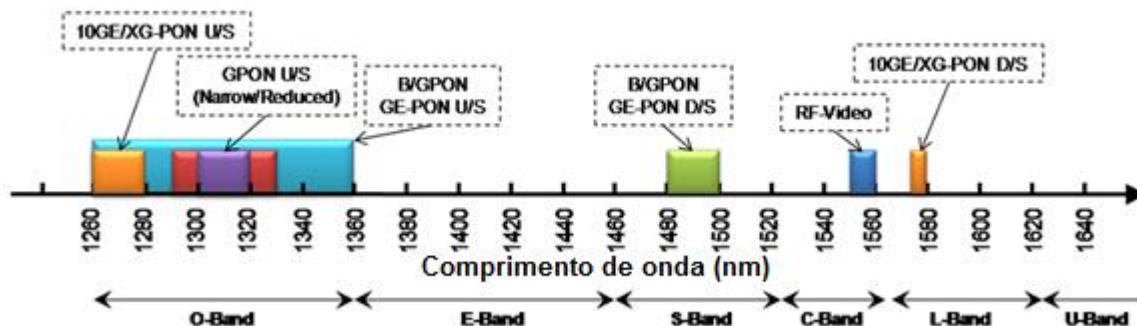


Figura 7 - Planos de comprimento de onda das tecnologias anteriores a NG-PON2[24].

Os planos de comprimento de onda para NG-PON2, foram especificados na recomendação ITU-T G.989.2 [27] permitindo a coexistência através da sobreposição dos comprimentos de onda com os anteriores sistemas PON. O espectro partilhado permite coexistência total com G-PON, XG-PON1, RF-Vídeo (Radio Frequency Video) e TWDM-PON.

Os planos de comprimento de onda para NG-PON2 são apresentados na Tabela 1, sendo que quando é usado um único dispositivo para multiplexagem, a banda de guarda requerida é de 100 GHz [27].

Sistemas compatíveis	TWDM-PON	
	Downstream	Upstream
G-PON, RF Video, XG-PON1	1596-1603 nm	Opção Banda Larga 1524-1544 nm
		Opção Banda Reduzida 1528-1540 nm
		Opção Banda Estreita 1532-1540 nm

Tabela 1 - Planos de comprimento de onda para NG-PON2 [27]

### 2.6.3. Alcance

Os sistemas NG-PON2 devem suportar um alcance de fibra de pelo menos 40 km sem a utilização de extensão de alcance. Devem também ser capaz de alcançar 60 km com a utilização de extensão de alcance [24].

#### 2.6.4. Código de linha

Para ambos os sentidos downstream e upstream, a TWDM-PON utiliza NRZ com embaralhamento[27].

### 2.7. UDWDM-PON

Na Figura 8, é apresentado o conceito de uma rede UDWDM. Uma OLT fornece até 1000 comprimentos de onda individuais com um espaçamento reduzido de 2.8 GHz. Cada ONU recebe o seu comprimento de onda e emite o comprimento de onda de upstream com a distância fixa para o comprimento de onda de downstream de aproximadamente 1 GHz [28].

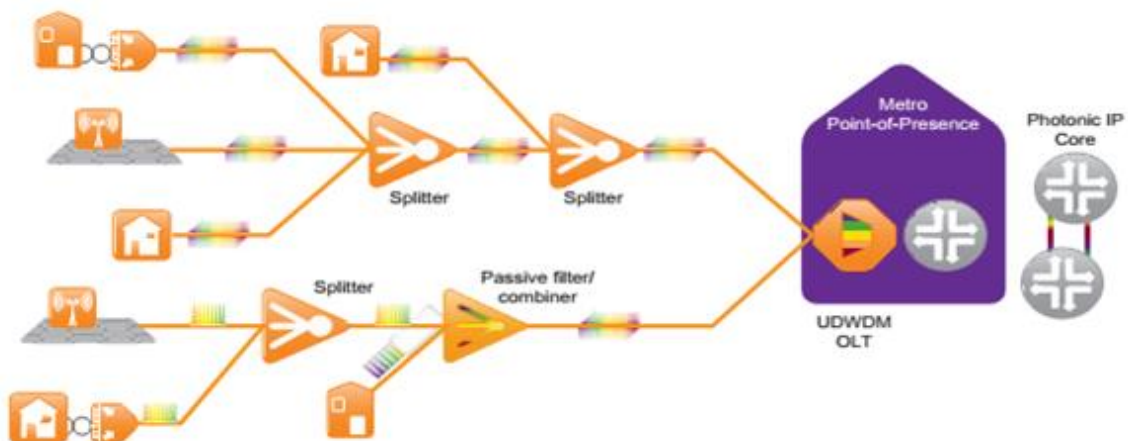


Figura 8 - Conceito de uma rede UDWDM [28]

UDWDM trabalha com divisores óticos passivos e filtros AWG, tornando-a uma tecnologia PON compatível com as ODNs existentes [28].

Para cumprir requisitos de flexibilidade, custo e escalabilidade, UWDM combina diversas tecnologias e inovações [28]:

- Modulação IQ avançada para gerar 10 comprimentos de onda a partir de um único laser;
- Detecção coerente para aumento da performance ótica;
- Circuitos de fotônica integrada (SiP- Silicon Photonics) para obter uma maior integração e eficiência;

- Tecnologia de par de canais (PCT-Paired-Channel Technology), em combinação com um plano de comprimento de onda inteligente;
- Partilha de comprimentos de onda e multiplexagem para obter escalabilidade de 100 Mbit/s até 10 Gbit/s.

### 2.7.1. Formatos de Modulação

Com o aumento da necessidade de largura de banda nos sistemas de comunicação óticos, surgiu o aumento dos ritmos de transmissão no entanto é importante manter a qualidade do sinal [29]. Usando principalmente formatos de modulação *on/off* (OOK-On/Off-Keying), nomeadamente NRZ e RZ (Return to Zero), o aumento do ritmo de transmissão torna estes formatos de modulação ineficientes.

Com espaçamentos entre canais reduzidos, o que implica maior eficiência espectral, formatos de modulação com um espectro ótico mais estreito como o QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) e QAM (Quadrature Amplitude Modulation) são a solução.

NRZ-OOK é o formato de modulação dominante nos sistemas de comunicação de fibra ótica [30]. Com uma largura espectral de  $2B$ , onde  $B$  é o ritmo do sinal, apresenta uma eficiência espectral de  $1/2$ .

O diagrama de blocos de um transmissor NRZ é apresentado na Figura 9, onde o sinal elétrico é modulado externamente através de um modulador de intensidade, dando origem a um formato de modulação de intensidade. O modulador de intensidade pode ser um Mach-Zehnder (MZM-Mach-Zehnder Modulator).

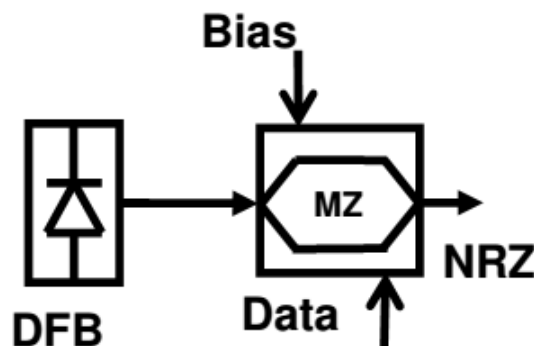


Figura 9 - Diagrama de blocos de um transmissor NRZ [30]

## QPSK

O formato de modulação QPSK, também conhecido como 4-PSK (4-Phase Shift Keying), apresenta os bits de informação codificados na fase da portadora ótica e a amplitude do sinal permanece constante [29]. O QPSK é um formato de multinível, codificando 2 bits por símbolo, apresentando assim o dobro da eficiência espectral do formato NRZ.

A Figura 10, mostra a arquitetura de um modulador QPSK usando um MZM, a luz proveniente do laser é conduzida à entrada do MZM, onde é dividido por um divisor de 3dB em dois ramos: fase (I de In-phase) e quadratura (Q) [31]. O ramo Q sofre uma rotação de fase de  $90^\circ$ . Em ambos os ramos são gerados dois sinais PSK independentes através do uso de dois MZMs. Finalmente um acoplador de 3 dB é usado para juntar os dois sinais modulados em fase, originando assim o sinal QPSK [31].

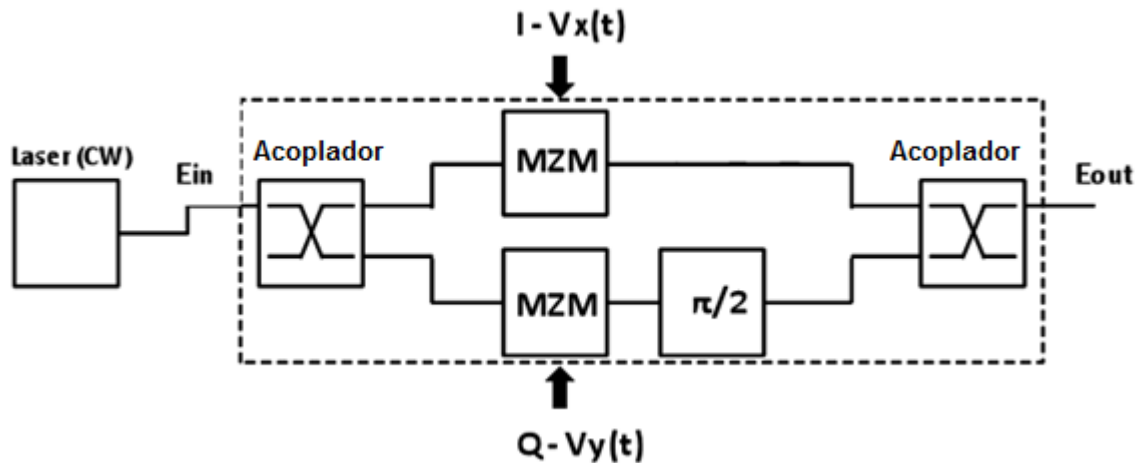


Figura 10 - Arquitetura de um modulador IQ [31]

## 16-QAM

QAM é um formato de modulação híbrido, combinando o ASK e PSK. Neste caso são codificados 4 bits por símbolo, originando um espectro mais estreito, e uma eficiência espectral que é o dobro da do QPSK.

Existem diversas técnicas para gerar os sinais 16-QAM, entre elas, usando o modulador IQ apresentado na Figura 10.

### 2.7.2. Detecção Coerente

O estudo de comunicação coerente em fibra ótica iniciou-se em 1980s devido à grande sensibilidade dos recetores coerentes que poderiam aumentar a distância de transmissão, no entanto o seu estudo foi interrompido [32].

A necessidade de sistemas de fibra ótica com elevada performance, e em 2005, a demonstração da estimativa digital da fase da portadora em recetores coerentes, renovaram o interesse na detecção coerente [32] [33].

Devido à sua elevada sensibilidade e seletividade do sinal recebido, a detecção coerente permite que dois canais WDM coexistam com uma separação de frequência reduzida. Outra grande vantagem é também a sua eficiência espectral, permitindo o uso de modulação multinível como é o caso do QPSK e QAM [34].

A combinação de processamento digital de sinal (DSP-Digital Signal Processing), detecção coerente e formatos de modulação com maior eficiência espectral originaram o recetor ótico digital coerente [35].

Num recetor digital coerente existem 4 subsistemas chave [35]:

- Mapeamento do sinal ótico num conjunto de sinais elétricos;
- Conversão para o domínio digital dos sinais elétricos;
- Desmodulação digital, que converte as amostras digitais num conjunto de sinais ao ritmo de símbolo;
- Recetor externo, que inclui DSP.

A Figura 11 apresenta um recetor coerente homodino.

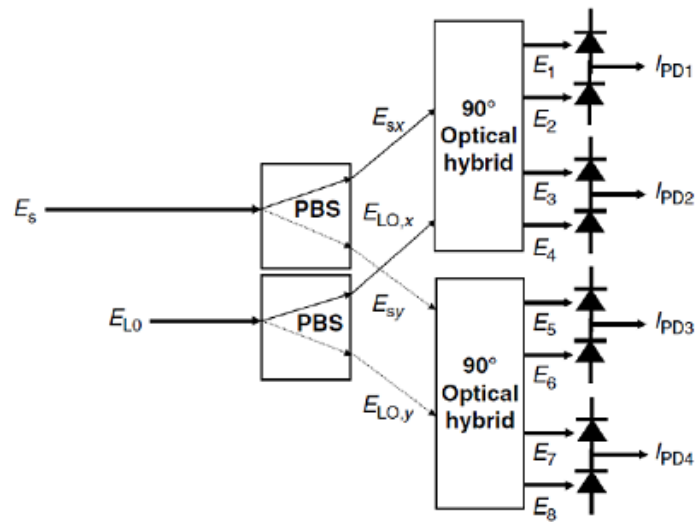


Figura 11 - Recetor coerente homodino [32]



O sinal recebido é separado em duas polarizações lineares através de um PBS (Polarization Beam Splitter). Através do híbrido ótico (90° Optical Hybrid), o sinal é misturado com o oscilador local (LO-Local Oscillator), originando os seguintes campos elétricos [34]:

$$E_{1,2} = \frac{1}{2} \left( E_{SX} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} E_{LO} \right) \quad (1)$$

$$E_{3,4} = \frac{1}{2} \left( E_{SX} \pm \frac{j}{\sqrt{2}} E_{LO} \right) \quad (2)$$

$$E_{5,6} = \frac{1}{2} \left( E_{SY} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} E_{LO} \right) \quad (3)$$

$$E_{7,8} = \frac{1}{2} \left( E_{SY} \pm \frac{j}{\sqrt{2}} E_{LO} \right) \quad (4)$$

Onde  $E_{SX}$  e  $E_{SY}$  são os dois campos elétricos ortogonais recebidos, correspondentes a polarização X e Y, e  $E_{LO}$  é o campo elétrico do oscilador local.

As correntes de saída são [34]:

$$I_{PD1}(t) = R \sqrt{\frac{\alpha P_S P_{LO}}{2}} \cos(\theta_S(t) - \theta_{LO}(t) + \delta) \quad (5)$$

$$I_{PD2}(t) = R \sqrt{\frac{\alpha P_S P_{LO}}{2}} \sin(\theta_S(t) - \theta_{LO}(t) + \delta) \quad (6)$$

$$I_{PD3}(t) = R \sqrt{\frac{(1-\alpha) P_S P_{LO}}{2}} \cos(\theta_S(t) - \theta_{LO}(t)) \quad (7)$$

$$I_{PD4}(t) = R \sqrt{\frac{(1-\alpha) P_S P_{LO}}{2}} \sin(\theta_S(t) - \theta_{LO}(t)) \quad (8)$$

Onde  $\alpha$  é relação de potência entre as duas componentes de polarização,  $\delta$  é a diferença entre as fases das duas componentes e  $R$  o parâmetro de responsividade. As correntes anteriores dão origem às correntes das duas polarizações [34]:

$$I_X(t) = I_{PD1}(t) + jI_{PD2}(t) \quad (9)$$

$$I_Y(t) = I_{PD3}(t) + jI_{PD4}(t) \quad (10)$$

O recetor descrito permite detetar duas polarizações, sendo que quando não é usada polarização apenas o ramo X se encontra ativo.

Na Figura 12 é apresentado o diagrama de blocos de um recetor digital coerente, com capacidade para processamento digital de sinal, apresentando assim a capacidade de recuperação de fase, assim como de compensação de dispersão cromática.

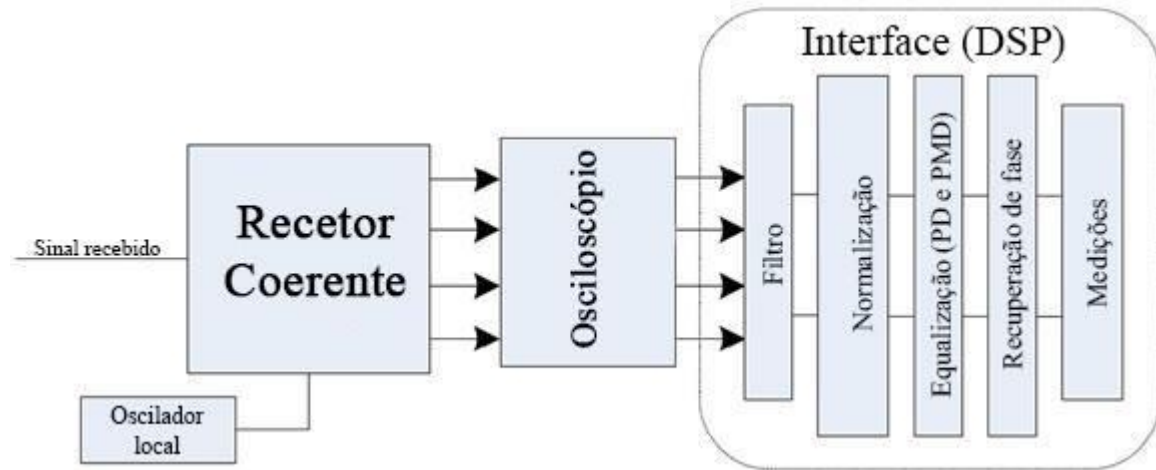


Figura 12 - Diagrama de blocos de um recetor digital coerente [34]

### 3. Resultados de simulação

Para a simulação das tecnologias PON foi usado o simulador VPI, com objetivo de obter resultados de comparação entre as mesmas. No simulador são definidos os seguintes parâmetros globais, em que BitRateDefault corresponde ao ritmo de transmissão da tecnologia a ser simulada:

- SampleRateDefault =  $32 \cdot \text{BitRateDefault}$
- TimeWindow =  $512 / \text{BitRateDefault}$

Nas simulações com fibra foi utilizada uma fibra com os parâmetros apresentados na Tabela 2.

Atenuação	0,2 dB/km
Dispersão	$10 \times 10^{-6} \text{ s/m}^2$
Declive da dispersão	$0.008 \text{ s/m}^3$

Tabela 2 - Parâmetros da fibra utilizada nas simulações

#### 3.1. G-PON

A tecnologia G-PON foi simulada no VPI de acordo com o diagrama de blocos apresentado na Figura 13.

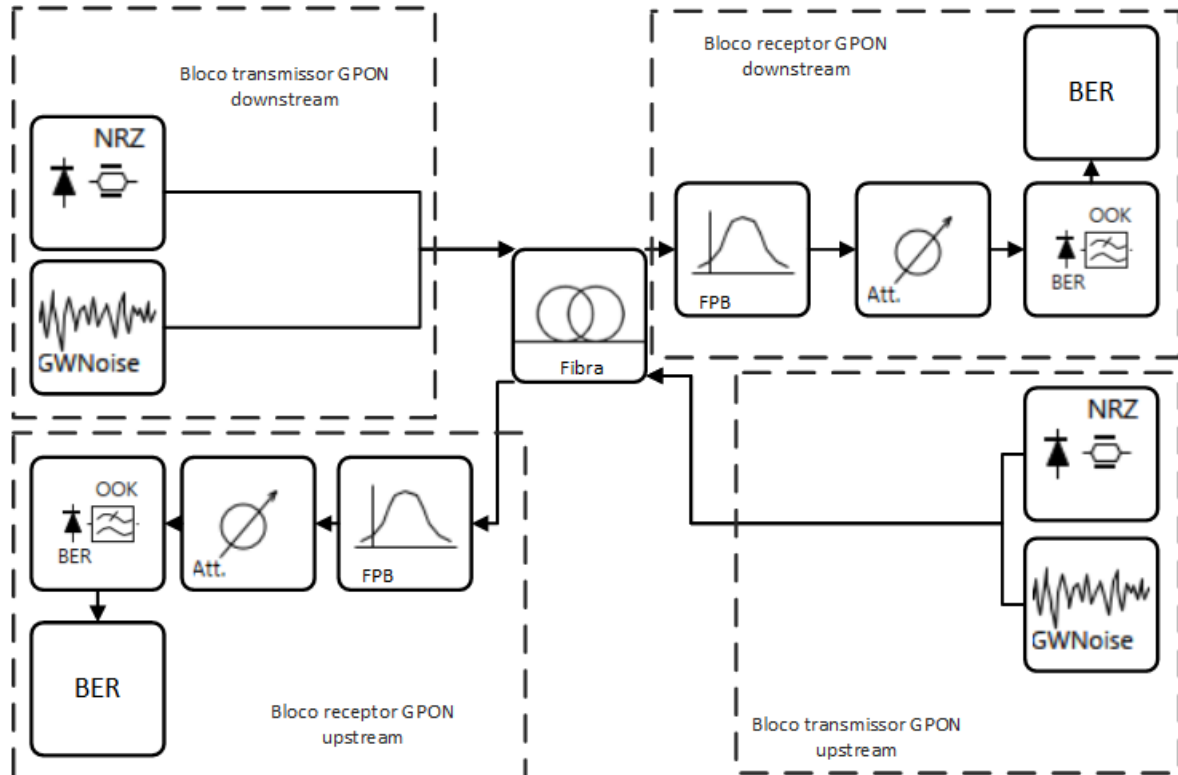


Figura 13 - Diagrama de blocos sistema G-PON

O transmissor consiste num laser CW (Continuous Wave), um codificador NRZ e um modulador MZ, originando o sinal ótico ao qual é adicionado ruído branco com uma densidade de potência de  $1 \times 10^{-16}$  W/Hz.

No bloco recetor encontra-se um filtro passa banda centrado na frequência do sinal transmitido e com largura de banda  $32 \times \text{BitRateDefault}$ , o bloco de atenuação que permite fazer um varrimento na atenuação, e um recetor ótico contendo um fotodíodo do tipo PIN, com estimação da taxa de erros. O recetor ótico tem também um filtro elétrico de largura  $0,75 \times \text{BitRateDefault}$ , e apresenta ruído térmico de  $3 \times 10^{-12}$  A/ $\sqrt{\text{Hz}}$ .

Os parâmetros de simulação do sistema G-PON encontram-se na Tabela 3.

Downstream		Upstream	
Potência média emissor	3 dBm	Potência média emissor	3 dBm
Comprimento de onda	1490 nm	Comprimento de onda	1310 nm
Ritmo	2.488 Gbps	Ritmo	1.244 Gbps

Tabela 3- Parâmetros de simulação do sistema G-PON

Para caracterizar a sensibilidade do sistema, foi transmitida uma potência fixa de 3dBm e criado um varrimento na atenuação por forma a variar a potência ótica recebida, esta simulação foi feita primeiramente sem fibra (B2B - Back-to-Back) e posteriormente para diversos comprimentos de fibra (20 km, 40 km, 60 km).

Na Figura 14 é possível observar a taxa de erros em função da potência ótica recebida.

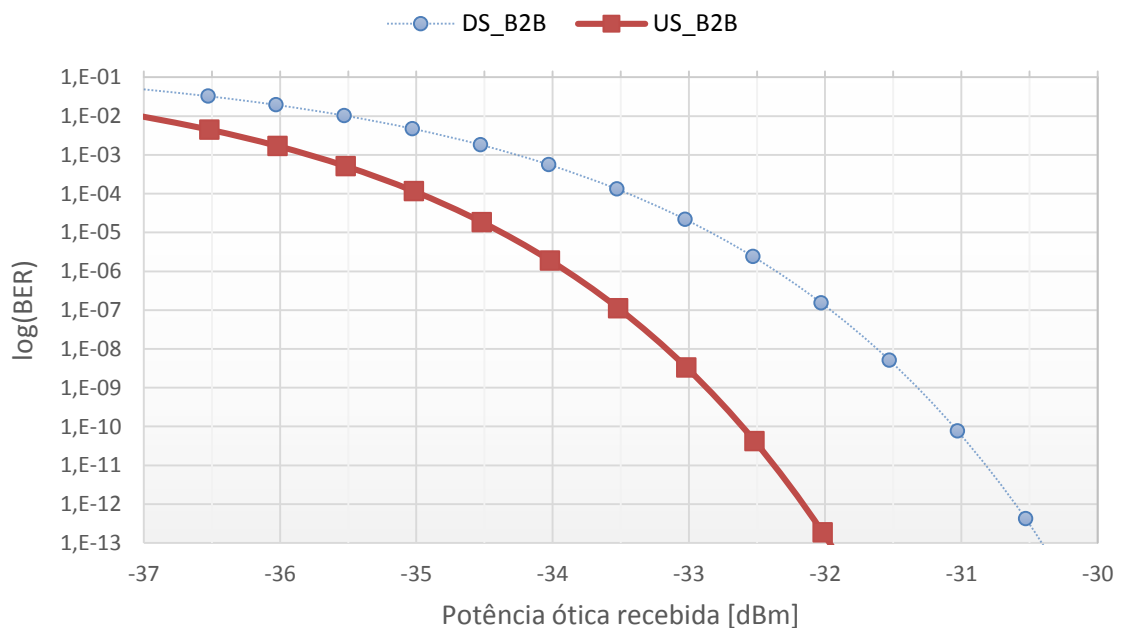


Figura 14 - Taxa de erros da tecnologia G-PON em função da potência ótica recebida

Considerando uma taxa de erros admissível de  $10^{-9}$  a potência mínima requerida no recetor no sentido downstream é de -31.5 dBm. Admitindo um código de correção de erros FEC, os estudos relativamente à sensibilidade serão efetuados considerando uma taxa de erros admissível de  $10^{-3}$ , assim no sentido downstream a potência mínima requerida é de -34 dBm.

Considerando novamente uma taxa de erros admissível de  $10^{-3}$ , a potência mínima requerida sem fibra no sentido upstream é de -35,5 dBm. Verifica-se que o sentido downstream necessita de mais 1.5 dB para uma taxa de erros  $10^{-3}$ , esta diferença deve-se ao valor distinto do valor quadrático médio do ruído térmico, que está diretamente relacionado com a largura de banda do ruído. Uma vez que o sentido downstream apresenta uma maior largura de banda, o ruído também será maior, daí necessitar de uma maior potência recebida.

Nas simulações efetuadas com fibra não se verificaram alterações relativamente à situação sem fibra uma vez que se está perante ritmos de transmissão baixos logo a dispersão não terá influência significativa.

### 3.2. XG-PON

O diagrama de blocos do sistema XG-PON simulado, pode ser consultado na Figura 15, é semelhante ao sistema G-PON alterando apenas os parâmetros de simulação.

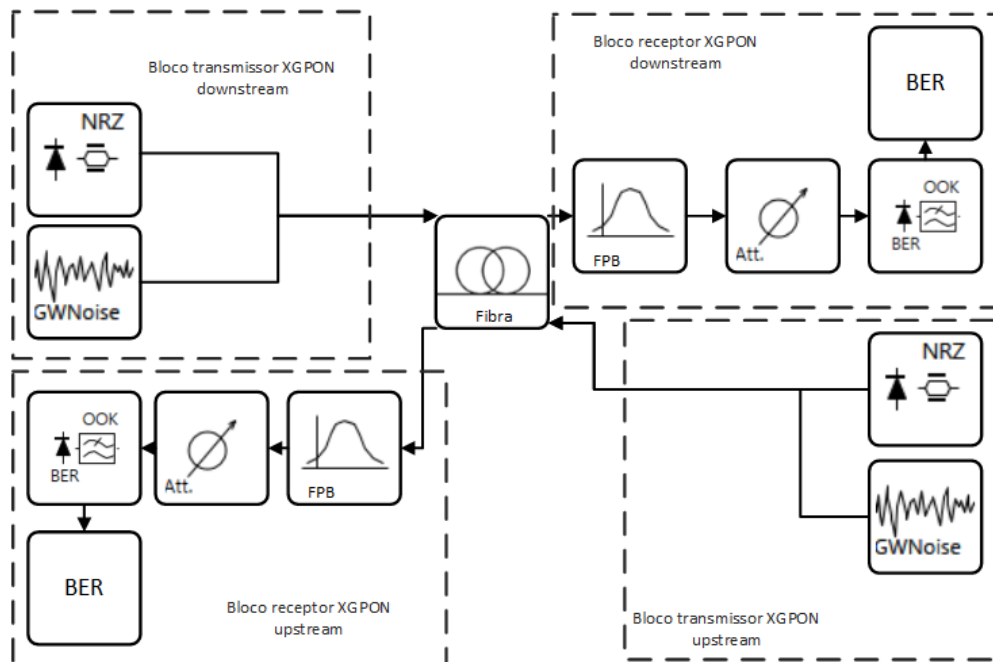


Figura 15- Diagrama de blocos do sistema XG-PON

Os transmissores e recetores usados para a simulação do sistema XG-PON são os mesmo que os referidos em 3.1.

Os parâmetros de simulação do sistema XG-PON podem ser consultados na Tabela 4, alterando relativamente ao sistema G-PON os comprimentos de onda e ritmos de ambos os transmissores.

Downstream		Upstream	
Potência média emissor	3 dBm	Potência média emissor	3 dBm
Comprimento de onda	1577 nm	Comprimento de onda	1270 nm
Ritmo	10 Gbps	Ritmo	2.5 Gbps

Tabela 4 - Parâmetros de simulação do sistema XG-PON

Para a análise da sensibilidade do sistema XG-PON, procedeu-se da mesma forma que no ponto 3.1. Os resultados obtidos para o sentido downstream podem ser visualizados na Figura 16.

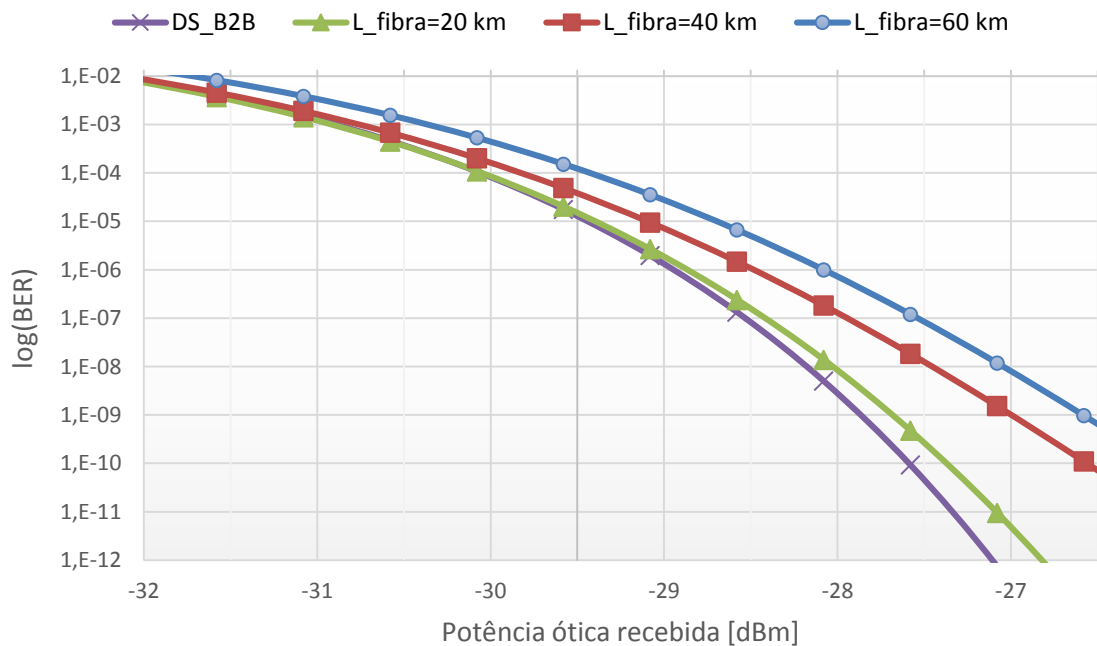


Figura 16-Taxa de erros em função da potência ótica recebida no sentido downstream da XG-PON

Pela análise da figura anterior conclui-se que sem fibra a potência requerida para uma taxa de erros de  $10^{-3}$  é de -30.5 dBm. Com a adição de fibra e com o aumento do comprimento

da mesma verifica-se um aumento na potência requerida uma vez que para um ritmo de 10 Gbit/s a dispersão já terá influência.

Para o sentido upstream a potência requerida é de -34 dBm, sendo a sua sensibilidade igual à do sentido downstream da G-PON uma vez que operam no mesmo ritmo.

Na Figura 17 é apresentada uma comparação entre o sentido downstream e upstream para o sistema XG-PON, é possível verificar que o sentido downstream requer uma potência maior devido ao seu ritmo de transmissão superior o que agrava o fenómeno de ruído térmico explicado em 3.1.

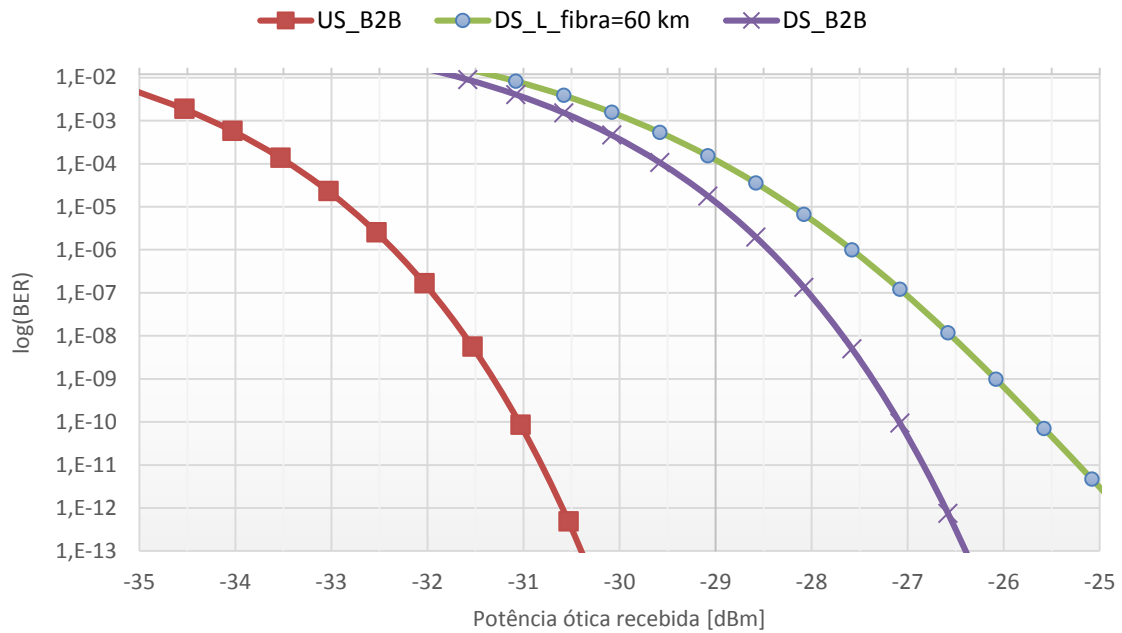


Figura 17- Comparação da taxa de erros entre o sentido downstream e upstream na XG-PON

### 3.3. TWDM-PON

O sistema TWDM-PON foi simulada com um ritmo de 40 Gbit/s downstream (4canais x 10 Gbit/s), e um ritmo de 10 Gbit/s (4canais x 2.5 Gbps) velocidade de upstream. Na Figura 18 é apresentado o diagrama de blocos do transmissor e recetor. Os transmissores e recetores apresentam a mesma constituição que os referenciados em 3.1.

Os parâmetros de simulação da TWDM-PON são apresentados na Tabela 5.

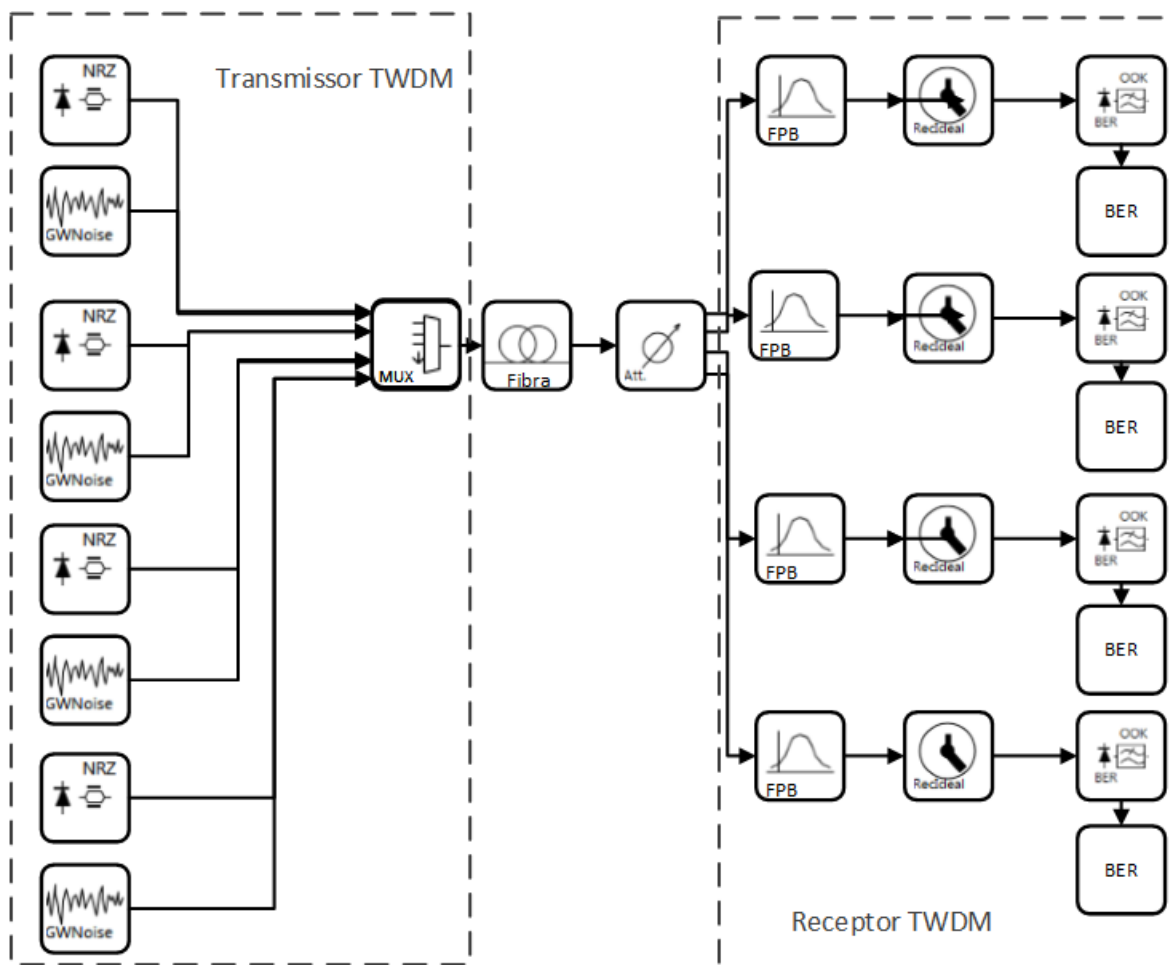


Figura 18- Esquema do transmissor e recetor TWDM

Downstream		Upstream	
Potência média emissor	3 dBm	Potência média emissor	3 dBm
Comprimento de onda $\lambda$ 1	1595.0	Comprimento de onda $\lambda$ 1	1530.33
Comprimento de onda $\lambda$ 2	1595.8	Comprimento de onda $\lambda$ 2	1531.12
Comprimento de onda $\lambda$ 3	1596.6	Comprimento de onda $\lambda$ 3	1531.90
Comprimento de onda $\lambda$ 4	1597.4	Comprimento de onda $\lambda$ 4	1532.68
Ritmo	10 Gbps	Ritmo	2.5 Gbps

Tabela 5- Parâmetros de simulação do sistema TWDM

A taxa de erros para diferentes potências de receção no sentido downstream para o sistema TWDM sem fibra é apresentada na Figura 19.



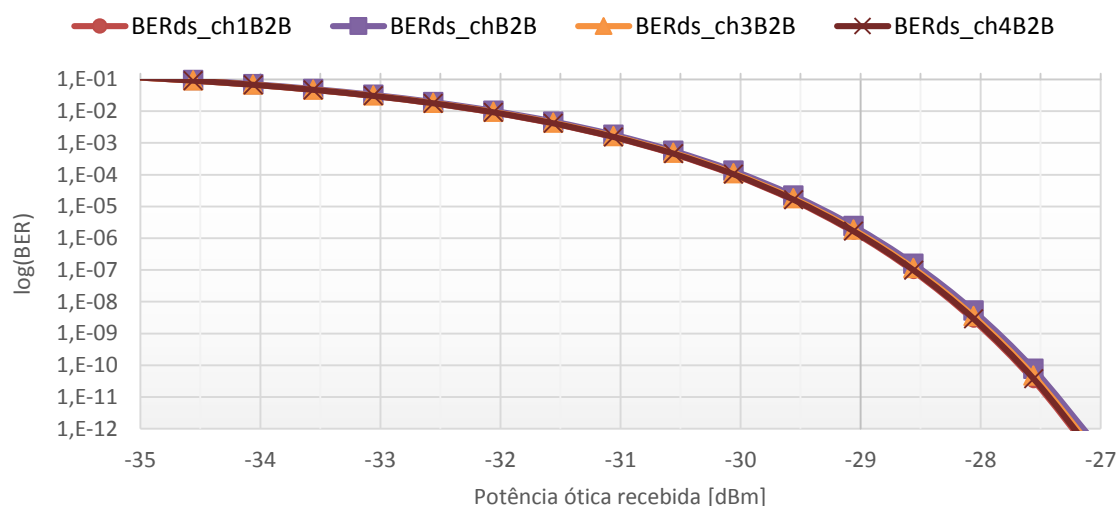


Figura 19-Taxa de erros do sistema TWDM no sentido downstream em B2B

Pela análise da taxa de erros relativamente à potência recebida, verifica-se que a potência requerida no recetor, para a situação sem fibra é de -31dBm, não havendo diferença significativa na sensibilidade entre os 4 canais.

O estudo comparativo entre a situação sem fibra e com fibra de comprimento 60 km é apresentado na Figura 20.

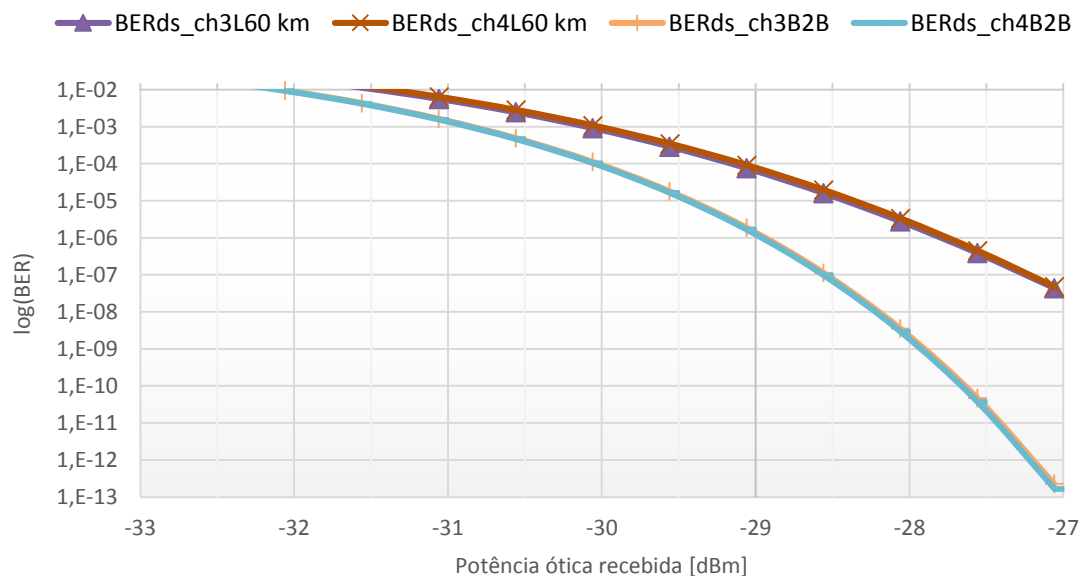


Figura 20 – Comparação da taxa de erros do sistema TWDM no sentido downstream em B2B e com fibra

É possível verificar que com a presença de fibra há um aumento na potência requerida para todos os canais, uma vez que transmitindo a um ritmo de 10 Gbit/s estes serão afetados pela dispersão.

Relativamente ao sentido upstream os resultados obtidos para a situação sem e com fibra são apresentados na Figura 21.

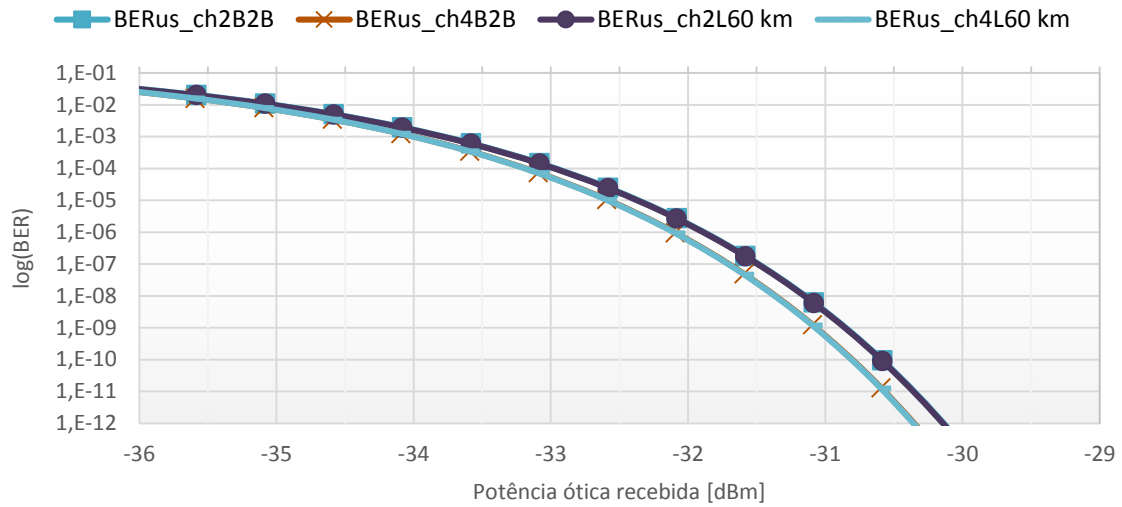


Figura 21 - TWDM upstream, estudo sem fibra e fibra de 60 Km

Para o sentido upstream o sistema TWDM-PON apresenta uma potência requerida de -34dBm, não havendo diferenças significativas quanto à sensibilidade para as situações com e sem fibra, tal como acontecia nas tecnologias anteriores para ritmos de 2.5 Gbps. A ligeira diferença relativamente aos canais apresentados deve-se à inclinação da curva de dispersão em função do comprimento de onda.

### 3.4. UDWDM-PON

O sistema UDWDM-PON foi simulado de acordo com o diagrama de blocos apresentado na Figura 22.

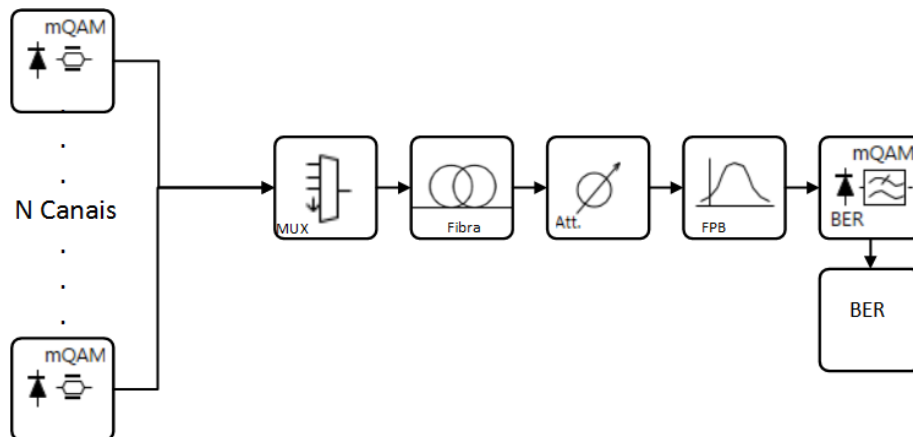


Figura 22 - Diagrama de blocos do sistema UDWDM

O bloco mQAM é um transmissor universal de sinais óticos modulados em fase e quadratura como é o caso do 16-QAM e do QPSK. O bloco incorpora um MZM, um laser, um gerador de sequências aleatórias e um codificador IQ. O recetor mQAM é um recetor ótico coerente que contém um oscilador local, híbridos óticos, filtros de pós-deteção, fotodíodos do tipo PIN e faz a estimativa do EVM (Error Vector Magnitude), o recetor efetua também recuperação de fase por forma a alinhar a constelação recebida com a constelação transmitida.

### 3.4.1. 16 Canais QPSK

Para a simulação do sistema UDWDM com o formato de modulação QPSK foram usados os parâmetros de simulação da Tabela 6.

Parâmetros do filtro			
Largura Banda		0.75xCS	
Função de transferência		Retangular	
Transmissor		Recetor	
Potência média do laser	3 dBm	Potência média do laser do oscilador local	3 dBm
Comprimento de onda do primeiro canal	1500 nm	Comprimento de onda do oscilador local	1500 nm
Espaçamento entre canais (CS)	$3 \times 10^9$ Hz	Ruido térmico	$3 \times 10^{-12}$ A/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Número de canais (N)	16		
Bits por Símbolo	2		
Ritmo	1.25 Gbps		

Tabela 6 - Parâmetros do sistema UDWDM QPSK

Os resultados de EVM obtidos em B2B são apresentados na Figura 23.

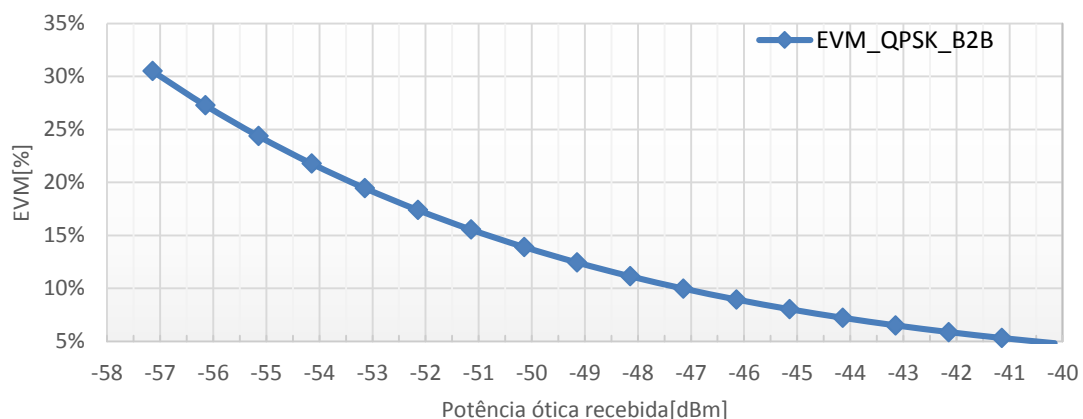


Figura 23 - EVM UDWDM 16 canais QPSK

É possível verificar para um EVM de 30% correspondente a uma taxa de erros de  $10^{-3}$  segundo o Anexo A, a potência requerida no recetor é de -57 dBm. Foram também feitas simulações para diversos comprimentos de fibra, no entanto não se verificaram diferenças relativamente à situação B2B, devido ao ritmo de transmissão baixo.

### 3.4.2. 16 Canais 16-QAM

Para a simulação do sistema UDWDM com o formato de modulação 16-QAM foram usados os parâmetros de simulação da Tabela 7.

Parâmetros do Filtro			
Largura Banda		0.75xCS	
Função de transferência		Retangular	
Transmissor		Recetor	
Potência média do laser	3 dBm	Potência média do laser do oscilador local	3 dBm
Comprimento de onda do primeiro canal	1500 nm	Comprimento de onda do oscilador local	1500 nm
Espaçamento entre canais (CS)	$3 \times 10^9$ Hz	Ruido térmico	$3 \times 10^{-12}$ A/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Número de canais (N)	16		
Bits por Símbolo	4		
Ritmo	1.25 Gbps		

Tabela 7 - Paramentos do sistema UDWDM 16-QAM

Os resultados de EVM obtidos em B2B para o sistema UDWDM usando o formato 16-QAM são apresentados na Figura 24.

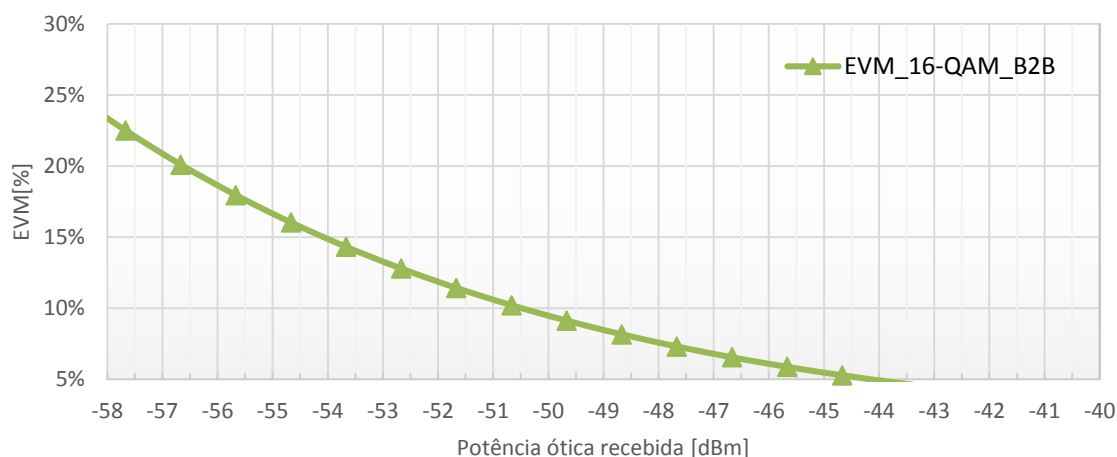


Figura 24- EVM sistema UDWDM 16canais 16-QAM

Verifica-se que para um EVM de 10% correspondente a uma taxa de erros de  $10^{-3}$  segundo o Anexo A, a potência requerida no recetor é de -50.5 dBm. Foram também

efetuadas simulações para diversos comprimentos de fibra, mas devido ao ritmo baixo de transmissão não se verificaram quaisquer diferenças.

Comparativamente ao sistema UDWDM transmitindo 16 canais QPSK, o sistema 16-QAM necessita de uma menor potência recebida para o mesmo valor de EVM, no entanto devido à sua constelação ser mais complexa, para a mesma taxa de erros, o sistema QAM necessita de um EVM inferior, o que implica uma potência requerida no recetor superior.

### 3.4.3. Cenário experimental

Foi estudado em laboratório a transmissão de 4 canais QPSK com o objetivo de verificar a variação do BER e do EVM com a potência ótica recebida. Cada canal QPSK foi gerado com um ritmo de 2.5 Gbit/s, e um espaçamento entre canais de 2.5 GHz. Os canais QPSK foram modulados através de MZMs alimentados por um pulso de Nyquist com um fator de 0.1. Na Figura 25 é apresentado o espectro dos sinais transmitidos.

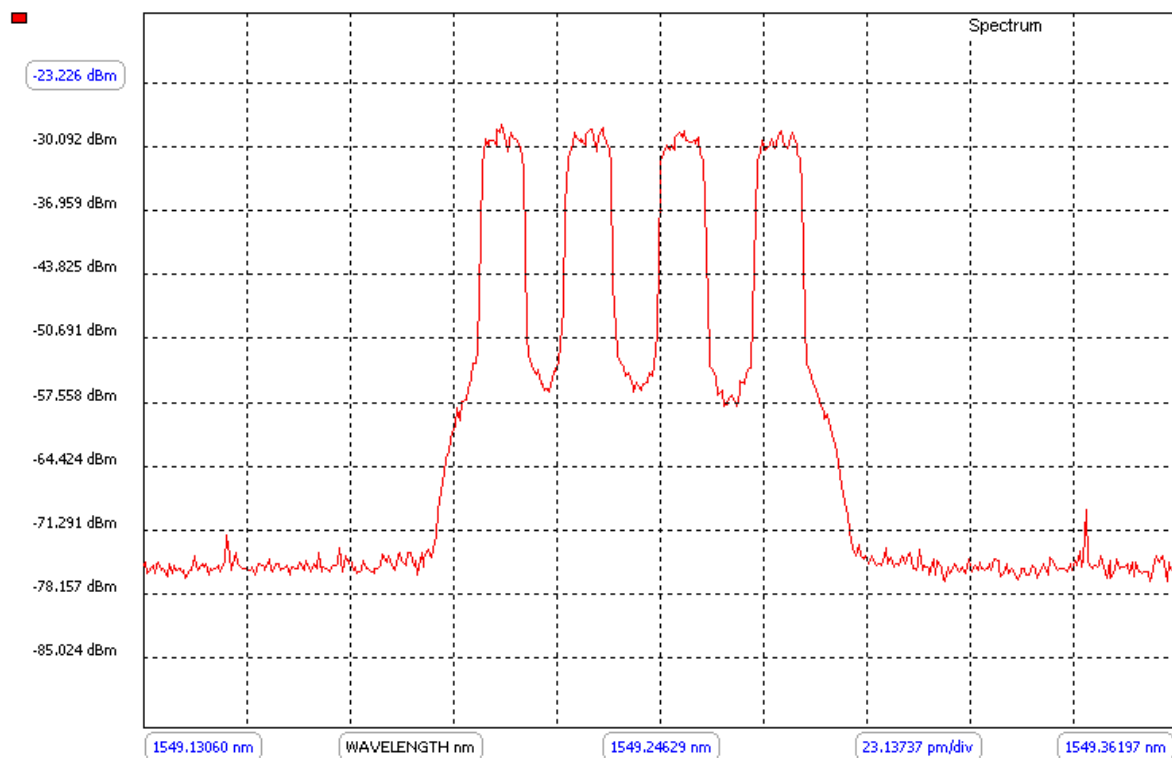


Figura 25 - Espectro dos sinais transmitidos

Os canais foram transmitidos ao longo de 8km de fibra SMF e feita a sua deteção num recetor coerente com posterior análise digital através da ferramenta OCR (Optical

Coherent Receiver) que permite a detecção de sinais QPSK e QAM. A ferramenta OCR incorpora um sistema de DPS contendo funções de compensação, decisão e medidas.

A interface da ferramenta OCR é apresentada na Figura 26, e o seu diagrama de blocos na Figura 27.

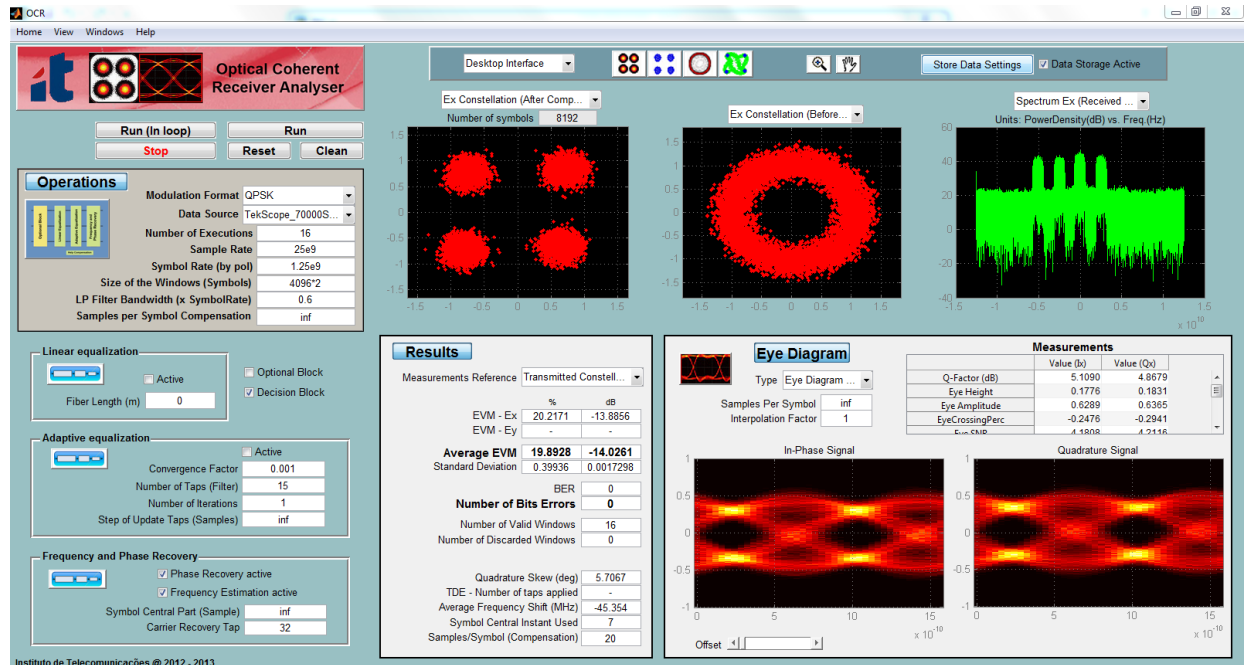


Figura 26 - Interface da ferramenta OCR

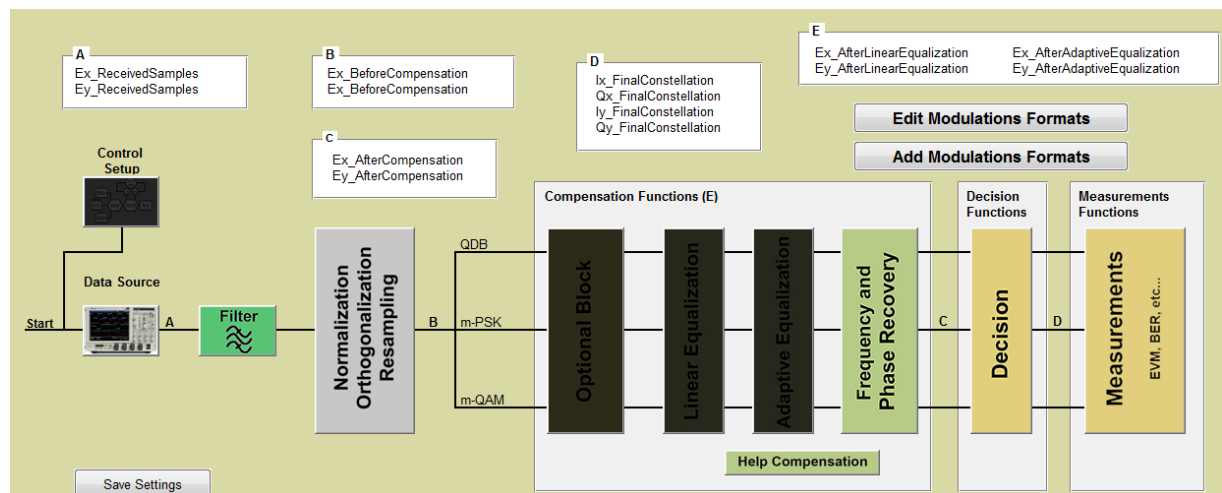


Figura 27 - Diagrama de blocos da ferramenta OCR

Na Figura 28 é apresentada variação da taxa de erros em função da potência ótica recebida, pode-se verificar que para uma taxa de erros de  $10^{-3}$ , a potência ótica requerida no recetor é de -47.5 dBm.

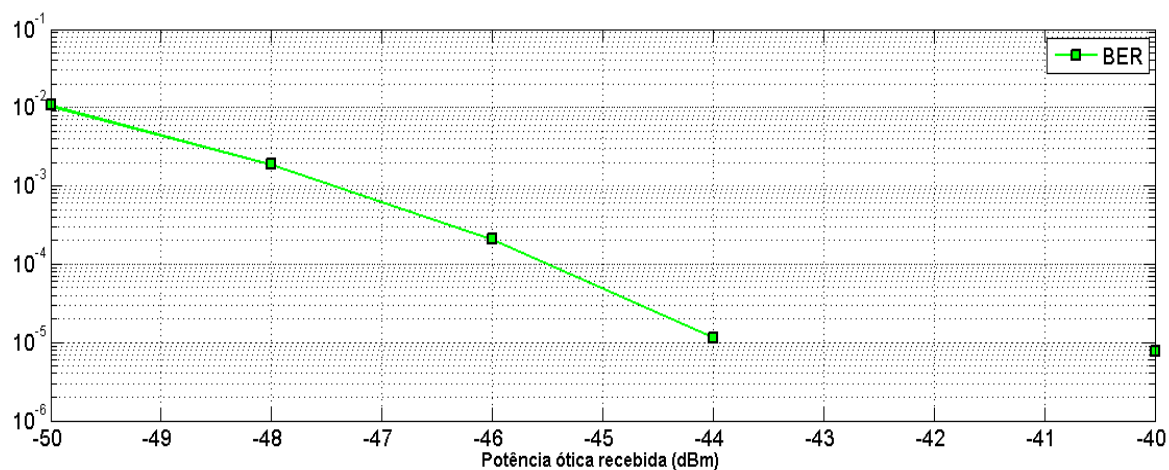


Figura 28 - Taxa de erros em função da potência ótica recebida

Na Figura 29 é apresentado o EVM em função da potência ótica recebida. Verifica-se que para a potência recebida de -47.5 dBm, correspondendo à potência necessária para uma taxa de erros de  $10^{-3}$ , o valor do EVM é de aproximadamente 30 %, o que comprova a relação entre o EVM e o BER apresentada no Anexo A.

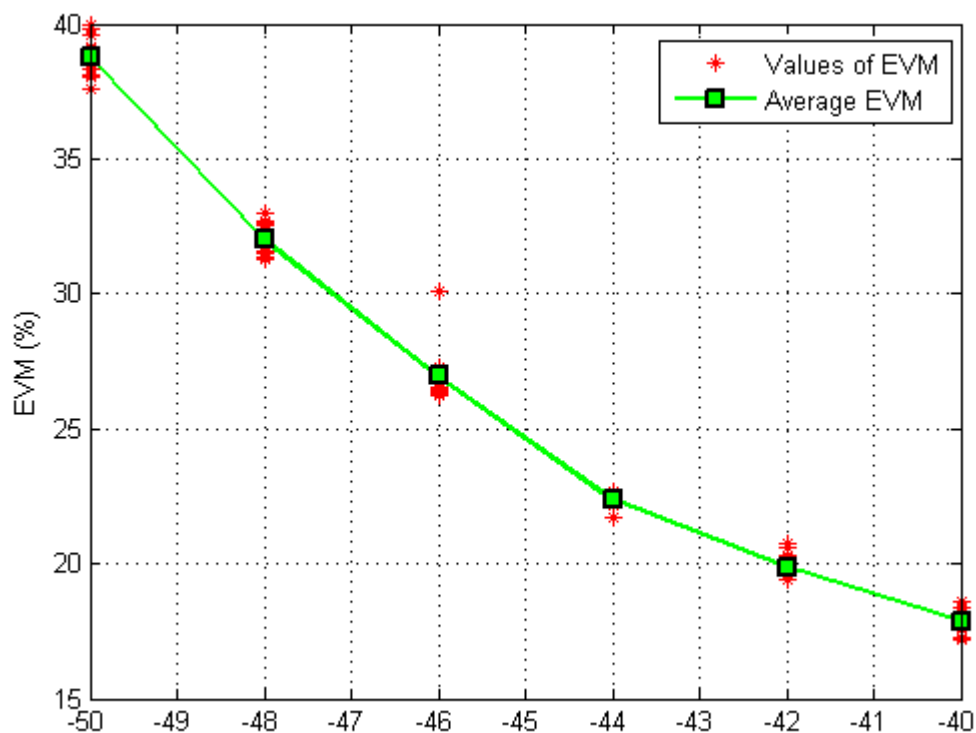


Figura 29 – EVM em função da potência ótica recebida





## 4. Cenários de coexistência

Os cenários de coexistência entre as tecnologias G-PON, XG-PON, TWDM-PON e UDWM-PON foram efetuados de acordo com o diagrama de blocos apresentado na Figura 30.

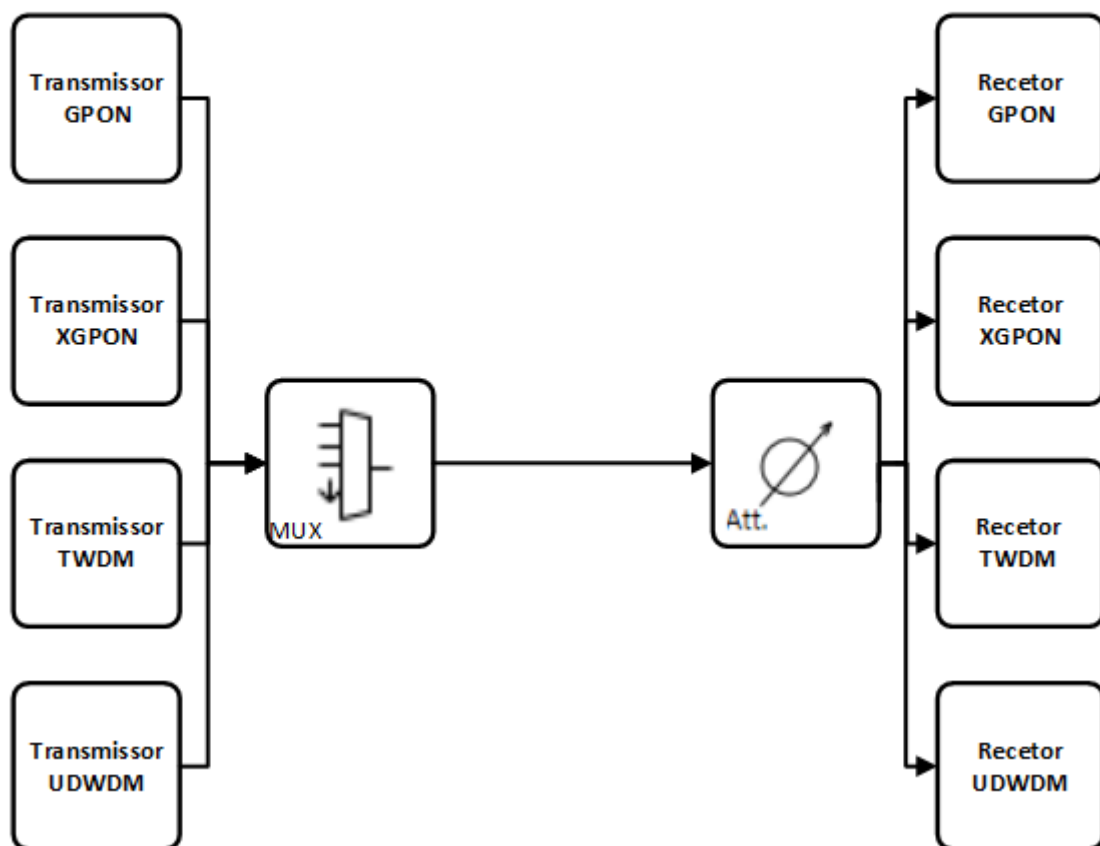


Figura 30- Diagrama de blocos do cenário de coexistência

Os parâmetros de simulação utilizados para cada uma das tecnologias foram mantidos relativamente aos parâmetros utilizados para simulação individual de cada uma das tecnologias. Os 16 canais QPSK do sistema UDWM-PON foram colocados junto a cada uma das tecnologias como um espaçamento  $\Delta f$ , e feito um estudo relativamente ao impacto do espaçamento  $\Delta f$  no EVM do canal mais próximo a cada uma das tecnologias.

Os cenários de coexistência foram estudados sem fibra e sem qualquer tipo de atenuação adicionada ao sistema.

## 4.1. UDWDM-PON adjacente à G-PON

Os 16 canais QPSK do sistema UDWDM foram colocados junto à G-PON, de acordo com o plano apresentado na Figura 31.

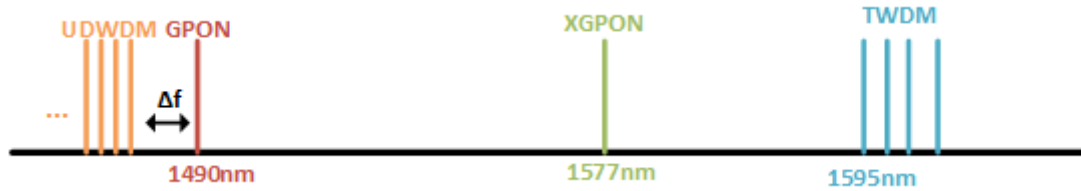


Figura 31 - Plano de comprimentos de onda com UDWDM adjacente à G-PON

Fazendo variar o espaçamento  $\Delta f$ , para uma potência de transmissão de 3dBm em todas as tecnologias e posteriormente utilizando as potências máximas de transmissão amissíveis para uma ODN classe N1 (G-PON: 5dBm, XG-PON: 6dBm e TWDM-PON: 4dBm), e mantendo os 3dBm no sistema UDWM, foi analisado o impacto do espaçamento no EVM do canal mais próximo à G-PON, resultado esse apresentado na Figura 32.

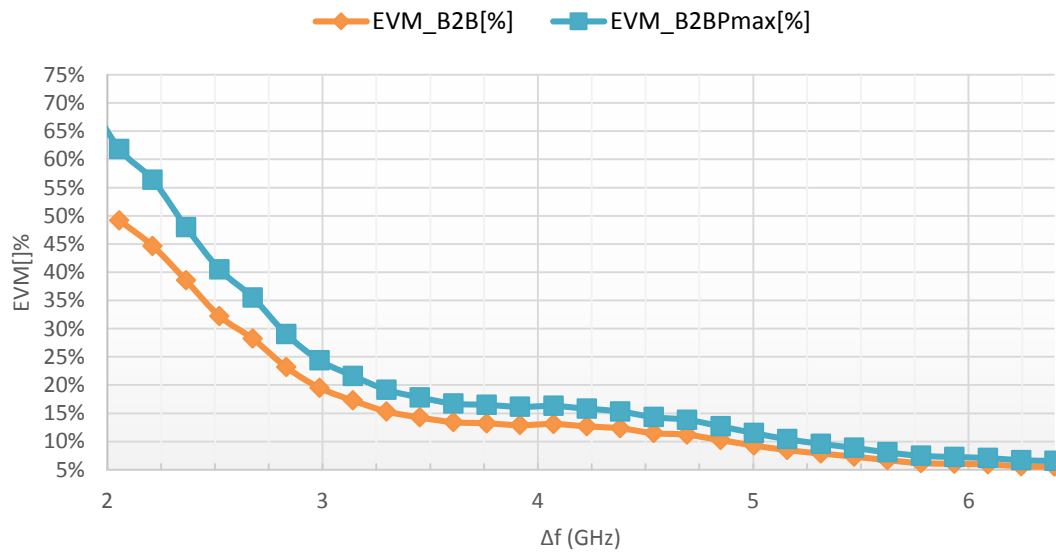


Figura 32 - Variação do EVM relativamente ao espaçamento  $\Delta f$

Para um EVM máximo de 30% pode-se observa que o espaçamento mínimo é de 2.5 GHz para a situação que foi utilizada a mesma potência de transmissão para todas as tecnologias e de 2.75 GHz para o caso em que foram utilizadas as potências máximas de cada uma das tecnologias.

Foi também estudada a relação entre o valor de EVM e a potência ótica recebida para diferentes valores de espaçamento  $\Delta f$ , resultados esses apresentados na Figura 33.

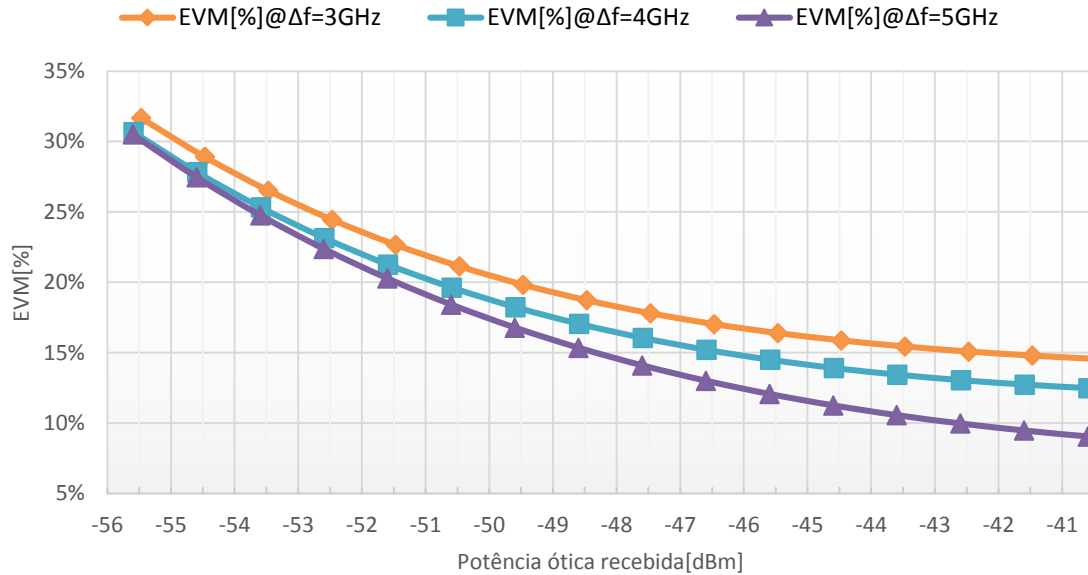


Figura 33 - Relação do EVM com a potência ótica recebida para diferentes valores de  $\Delta f$

É possível observar que para a mesma potência ótica recebida, utilizando um espaçamento  $\Delta f$  mais reduzido vai originar um maior valor de EVM.

## 4.2. UDWDM-PON adjacente à XG-PON

Os 16 canais QPSK do sistema UDWDM foram colocados junto à XG-PON, de acordo com o plano apresentado na Figura 34.

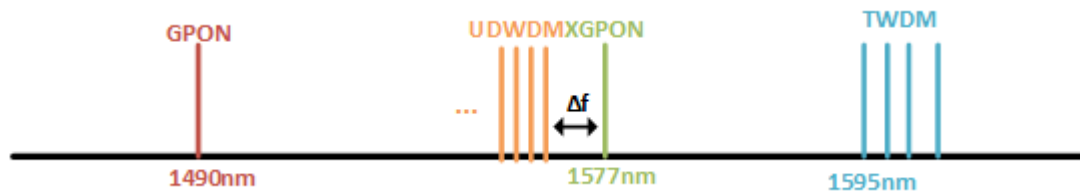


Figura 34 - Plano de comprimentos de onda com UDWDM adjacente à XG-PON

A análise relativa à variação do valor do EVM em função do espaçamento  $\Delta f$ , para potências de transmissão em todas as tecnologias de 3dBm é apresentada na Figura 35, como esperado, o valor de EVM decresce com o aumento do espaçamento  $\Delta f$ , sendo que para um EVM máximo de 30% o espaçamento mínimo necessário é de 6.5GHz, sendo portanto

superior ao cenário em que a UDWDM-PON era adjacente à G-PON, uma vez que a largura espectral da XG-PON é superior.

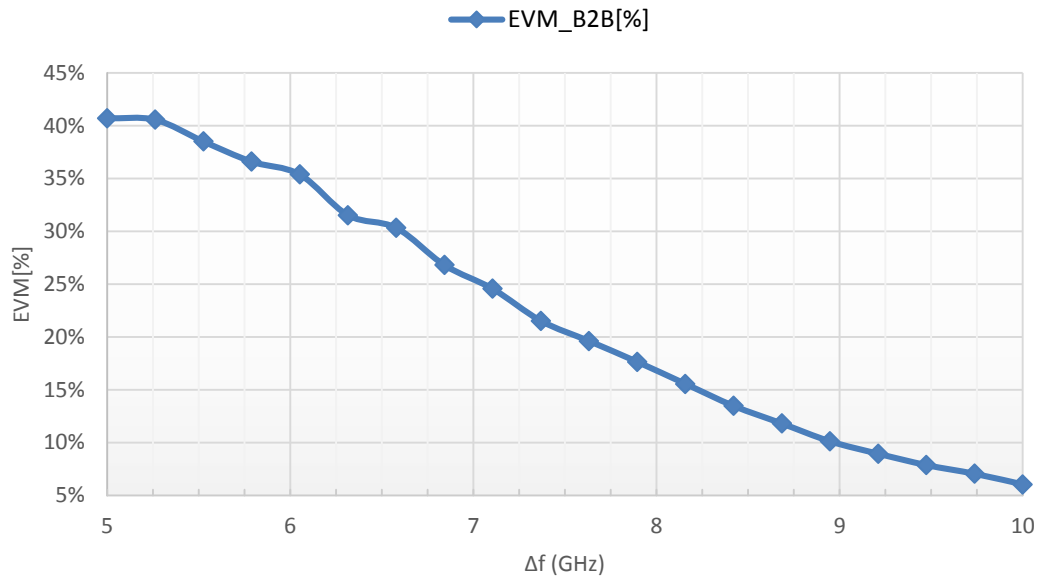


Figura 35 - Variação do EVM com o espaçamento  $\Delta f$ , colocando o UDWM adjacente à XG-PON

Na Figura 36 é apresentada a variação do valor do EVM em função da potência ótica recebida para diferentes valores de espaçamento  $\Delta f$ .

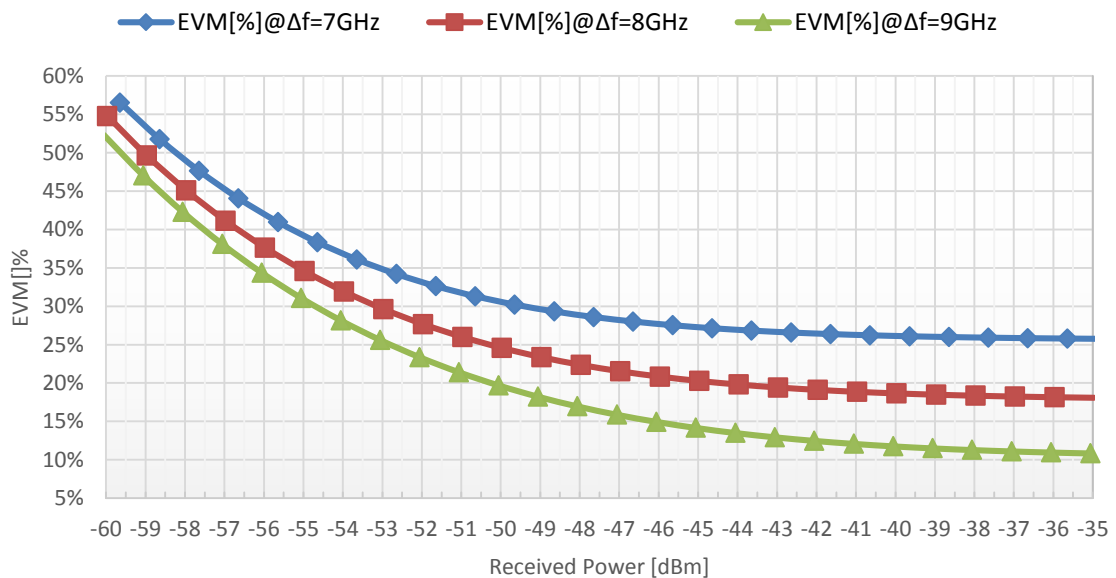


Figura 36 - Variação do EVM com a potência ótica recebida para diferentes espaçamentos  $\Delta f$

### 4.3. UDWDM-PON adjacente à TWDM-PON

Colocando os canais QPSK da UDWDM-PON adjacentes aos canais da TWDM-PON de acordo com o plano de comprimentos de onda apresentado na Figura 37, foi analisada a variação do EVM relativamente à variação do espaçamento  $\Delta f$ , obtendo resultados idênticos aos obtidos colocando a UDWDM-PON adjacente à XG-PON, dado que a largura espectral de cada canal TWDM é igual à largura da XG-PON. Pelo mesmo motivo a variação obtida no valor EVM em função da potência ótica recebida para diferentes valores de espaçamento  $\Delta f$ , é idêntica à obtida no cenário da UDWDM-PON adjacente à XG-PON.

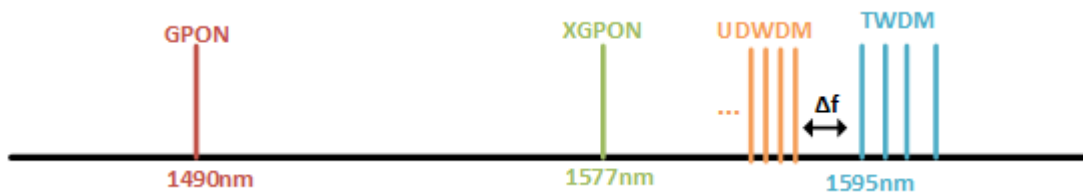


Figura 37 - Plano de comprimentos de onda com UDWDM adjacente à TWDM-PON



## 5. Conclusões e trabalho futuro

### 5.1. Conclusões

Devido ao contínuo crescimento na procura por redes de acesso com maior largura de banda, as tecnologias PON existentes deixarão de ser capazes de satisfazer as necessidades dos utilizadores. Apesar do grande progresso na evolução das redes de acesso, é necessária a continuação do estudo de redes de acesso com capacidade para cumprir as necessidades dos utilizadores no futuro.

Neste âmbito, nesta dissertação foi estudada a evolução das tecnologias PONs existentes assim como da UDWDM-PON, uma tecnologia que utiliza diversos canais de transmissão com espaçamento entre canais reduzido.

Inicialmente foi estudada evolução das tecnologias PON, apresentando as principais características das tecnologias G-PON, XG-PON e TWDM-PON, seguido de uma análise aos princípios da UDWDM-PON. Foram também abordados os formatos de modulação avançados, como o QPSK e 16-QAM, que apresentam uma maior eficiência espectral, possibilitando a utilização de um espaçamento reduzido entre os canais da UDWDM-PON. Foi também analisada a deteção coerente, que com a utilização de processamento digital de sinal possibilita a recuperação de fase e compensação de fenómenos como é o caso da dispersão cromática, permitindo assim uma melhoria na receção do sinal transmitido.

Posteriormente, utilizando o simulador VPI, procedeu-se ao estudo de cada uma das tecnologias de forma individual, analisando a variação da taxa de erros com a potência ótica recebida. Foi possível verificar que com o aumento do ritmo de transmissão a potência ótica requerida para uma determinada taxa de erros também aumenta. Foi também observada que a introdução de fibra para ritmos de transmissão elevados, degrada o desempenho, devido à dispersão cromática. Analisou-se também a transmissão de 16 canais UDWDM-PON, verificando-se que para a transmissão usando um formato de modulação 16-QAM, a potência necessária no recetor é superior relativamente ao cenário de transmissão usando o formato de modulação QPSK, uma vez que se está perante um formato de modulação mais complexo.

Finalmente foi estudada a coexistência da UDWDM-PON com a G-PON, XG-PON e TWDM-PON, analisando o impacto da aproximação da UDWDM-PON às restantes tecnologias. Verificou-se que reduzindo o espaçamento para as outras tecnologias, a performance da UDWDM-PON era degradada, levando a valores EVM superiores. Verificou-se especialmente na aproximação da UDWDM-PON à XG-PON e TWDM-PON que operam a ritmos superiores, um aumento na potência requerida para um determinado EVM quando da redução do espaçamento.

## **5.2. Trabalho futuro**

Após os resultados obtidos nesta dissertação é de todo interesse continuar o estudo de cenários de coexistência da UDWDM-PON com as PONs existentes. Para tal sugere-se para trabalho futuro os seguintes tópicos:

- Estudo de cenários de coexistência com fibra, por forma a observar o impacto da dispersão quando da aproximação da UDWDM-PON às restantes tecnologias;
- Análise do impacto de fenómenos não lineares nos canais da UDWDM-PON;
- Utilização de formatos de modulação avançados, como 32-QAM e 64-QAM, etc. assim como de transmissão de sinais com polarização;



## 6. Bibliografia

- [1] «Number of Internet Users (2015) - Internet Live Stats.» [Em linha]. Disponível em: <http://www.internetlivestats.com/internet-users/>. [Acedido: 28-Nov-2015].
- [2] L. G. Kazovsky, N. Cheng, W.-T. SHAW, D. GUTIERREZ, e SHING-WAWONG, «Broadband Optical Access Networks», em *CHAPTER 1, p11*, I. JohnWiley & Sons, Ed. 2011.
- [3] «ITU: Committed to connecting the world.» [Em linha]. Disponível em: <http://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>. [Acedido: 28-Nov-2015].
- [4] «IEEE - About IEEE.» [Em linha]. Disponível em: <http://www.ieee.org/about/index.html>. [Acedido: 28-Nov-2015].
- [5] «FSAN.» [Em linha]. Disponível em: <http://www.fsan.org/>. [Acedido: 28-Nov-2015].
- [6] «VPIphotonics: Simulation Software and Design Services.» [Em linha]. Disponível em: <http://www.vpiphotonics.com/FNF.php>. [Acedido: 02-Dez-2015].
- [7] Cedric F. Lam, «Passive Optical Networks: Principles and Practice», em *Chapter 1, p7*, E. Inc., Ed. 2007.
- [8] L. G. Kazovsky, N. Cheng, W.-T. SHAW, D. GUTIERREZ, e SHING-WAWONG, «Broadband Optical Access Networks», em *CHAPTER 1, p12*, I. JohnWiley & Sons, Ed. 2011.
- [9] ITU-T, «ITU-T Recommendation G.983.1 Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)», 1998.
- [10] L. G. Kazovsky, N. Cheng, W.-T. SHAW, D. GUTIERREZ, e SHING-WAWONG, «Broadband Optical Access Networks», em *CHAPTER 1, p13*, I. JohnWiley & Sons, Ed. 2011.
- [11] «IEEE 802.3 ETHERNET.» [Em linha]. Disponível em: <http://www.ieee802.org/3/>. [Acedido: 28-Nov-2015].
- [12] «IEEE P802.3ah Ethernet in the First Mile Task Force.» [Em linha]. Disponível em: <http://www.ieee802.org/3/efm/>. [Acedido: 30-Nov-2015].
- [13] ITU-T, «ITU-T Recommendation G.984.1 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics», *ITU-T G-SERIES RECOMMENDATIONS*, pp. 1–43, 2008.
- [14] Cedric F. Lam, «Passive Optical Networks: Principles and Practice», em *Chapter 2, p19*, E. Inc., Ed. 2007.
- [15] ITU-T, «ITU-T Recommendation G.984.2 Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification», *ITU-T G-SERIES RECOMMENDATIONS*, pp. 1–38, 2003.
- [16] ITU-T, «ITU-T Recommendation G.984.3 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Transmission convergence layer specification», *ITU-T G-SERIES RECOMMENDATIONS*, 2014.
- [17] ITU-T, «ITU-T Recommendation G.987.1 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements», *ITU-T G-SERIES RECOMMENDATIONS*, pp. 1–52, 2010.
- [18] ITU-T, «ITU-T Recommendation G.987 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms», *ITU-T G-SERIES RECOMMENDATIONS*, 2010.
- [19] ITU-T, «ITU-T Recommendation G.987.3 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-

- PON): Transmission convergence (TC) layer specification», *ITU-T G-SERIES RECOMMENDATIONS*, 2014.
- [20] ITU-T, «ITU-T Recommendation G.987.2 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification», *ITU-T G-SERIES RECOMMENDATIONS*, 2010.
  - [21] F. Effenberger, «XG-PON1 versus NG-PON2: Which One Will Win?», *European Conference and Exhibition on Optical Communication*, p. Tu.4.B.1, 2012.
  - [22] Y. Luo e F. Effenberger, «TWDM-PON The solution of choice for NG-PON2», *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. 31, n. 68, pp. 9–13, 2013.
  - [23] PTinovacao, «Evolution-of-FTTH-Networks-for-NG-PON2», *PT inovação White Paper*, n. July, 2013.
  - [24] ITU-T, «ITU-T Recommendation G.989.1 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements», *ITU-T G-SERIES RECOMMENDATIONS*, pp. 1–26, 2013.
  - [25] Y. Luo, X. Zhou, F. Effenberger, X. Yan, G. Peng, Y. Qian, e Y. Ma, «Time- and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation PON stage 2 (NG-PON2)», *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, n. 4, pp. 587–593, 2013.
  - [26] P. Bruna, «Contextos de Convergencia em Redes de Acesso de Nova Geração», 2014.
  - [27] ITU-T, «ITU-T Recommendation G.989.2 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification», *ITU-T G-SERIES RECOMMENDATIONS*, 2014.
  - [28] N. S. Networks, «Nokia Siemens Networks Future optical connectivity», *UDWDM Technical White Paper*, 2012.
  - [29] L. Zhao, H. Shankar, e A. Nachum, «40G QPSK and DQPSK modulation», *Inphi Corporation*, pp. 1–18, 2008.
  - [30] M. Haris, «High-Bit-Rate Optical Networks High-Bit-Rate Optical Networks», 2008.
  - [31] L. J. Calton, S. D. Gillingwater, G. W. Hammond, e D. P. Cooper, «[ Application Note ]Setting-up a QPSK modulator», pp. 1–4.
  - [32] K. Kikuchi, «High Spectral Density Optical Communication Technologies», em *Chapter 2*, 2010.
  - [33] E. Ip, A. Pak, T. Lau, D. J. F. Barros, e J. M. Kahn, «Coherent detection in optical fiber systems», *OPTICS EXPRESS* 753, vol. 16, n. 2, pp. 861–866, 2008.
  - [34] R. M. Ferreira, A. Shahpari, M. Lima, e A. L. Teixeira, «Coherent Fiber Communications Analyzer», *Electrónica e Telecomunicações*, vol. 5, n. 4, pp. 454–457, 2012.
  - [35] S. J. Savory, «Digital Coherent Optical Receivers: Algorithms and Subsystems», *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 16, n. 5, pp. 1164–1179, 2010.
  - [36] W. Freude, R. Schmogrow, B. Nebendahl, M. Winter, A. Josten, D. Hillerkuss, S. Koenig, J. Meyer, M. Dreschmann, M. Huebner, C. Koos, J. Becker, e J. Leuthold, «Quality metrics for optical signals: Eye diagram, Q-factor, OSNR, EVM and BER», *International Conference on Transparent Optical Networks*, vol. 1, pp. 3–6, 2012.
  - [37] R. A. Shafik, «On the Extended Relationships Among EVM , BER and SNR as Performance Metrics», *4th Internation Conferenc on Electrical and Computer Engineering*, n. December, pp. 19–21, 2006.
  - [38] R. Schmogrow, B. Nebendahl, M. Winter, A. Josten, D. Hillerkuss, S. Koenig, J. Meyer, M. Dreschmann, M. Huebner, C. Koos, J. Becker, e W. Freude, «Error Vector Magnitude as a Performance Measure for Advanced Modulation Formats», *IEEE PHOYONICS*

*TECHNOLOGY LETTERS*, vol. 24, n. 1, pp. 2011–2013, 2012.

- [39] M. D. McKinley, K. A. Remley, M. Myslinski, J. S. Kenney, e B. Nauwelaers, «EVM Calculation for Broadband Modulated Signals \*», *64th ARFTG Conf. Dig.*, pp. 45–52, 2004.
- [40] R. A. Shafik, S. Rahman, A. H. M. R. Islam, e N. S. Ashraf, «On The Error Vector Magnitude As A Performance Metric And Comparative Analysis», *IEEE--ICET 2006 2nd International Conference on Emerging Technologies*, n. November, pp. 13–14, 2006.



## Anexo A

### Medidas de qualidade de um sinal ótico

A medição da qualidade dos sinais óticos é uma das mais importantes tarefas nas comunicações óticas, existindo várias medidas, entre elas a relação sinal ruído, o BER e o EVM [36] [37].

#### Error Vector Magnitude (EVM)

Em formatos de modulação avançados como o caso do QAM em que o sinal é codificado em fase e amplitude utilizasse o EVM, que descreve a distância efetiva do símbolo recebido ao símbolo ideal [38].

Na Figura 38, encontra-se a constelação de um sinal QAM e o exemplo de um vetor de erro.

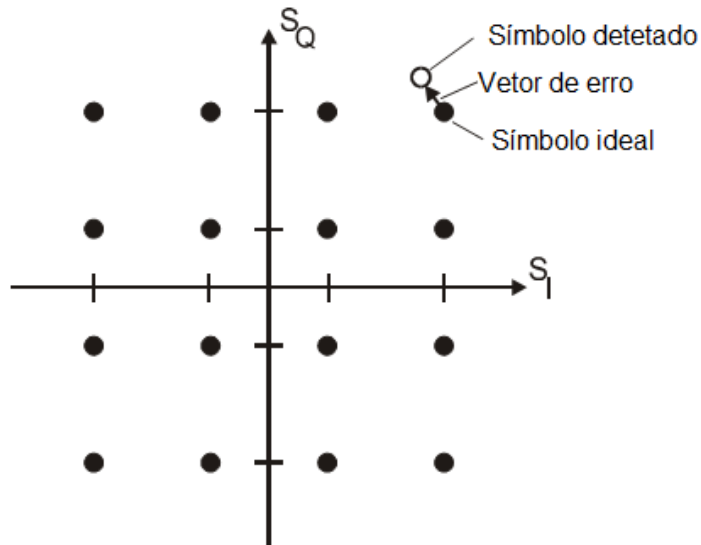


Figura 38 - Constelação 16-QAM com vetor de erro [39]

O valor de EVM para um determinado número de símbolos da constelação  $N$ , é matematicamente dado pela equação (11) [40]:

$$EVM_{RMS} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |s_n - s_{0,n}|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |s_{0,n}|^2} \quad (11)$$

Onde  $S_n$  é a norma do n-ésimo símbolo e  $S_{0,n}$  a norma do n-ésimo símbolo ideal Para estimativa do BER a partir do EVM, define-se  $L$  como o número de níveis da constelação e  $\log_2 M$  como o número de bits codificado em cada símbolo, obtendo a relação aproximada entre BER e EVM dada pela equação (12) [40]:

$$BER \approx \frac{2(1-\frac{1}{L})}{\log_2 L} Q \left[ \sqrt{\left[ \frac{3 \log_2 L}{L^2 - 1} \right] \frac{2}{EVM_{RMS}^2 \log_2 M}} \right] \quad (12)$$

Na Figura 39, é apresentada a relação entre o EVM e o BER, para diferentes formatos de modulação. Para uma taxa máxima de erros  $10^{-3}$ , é possível verificar que o valor de EVM máximo é aproximadamente 30% para o formato QPSK e 10% para o formato de modulação 16-QAM.

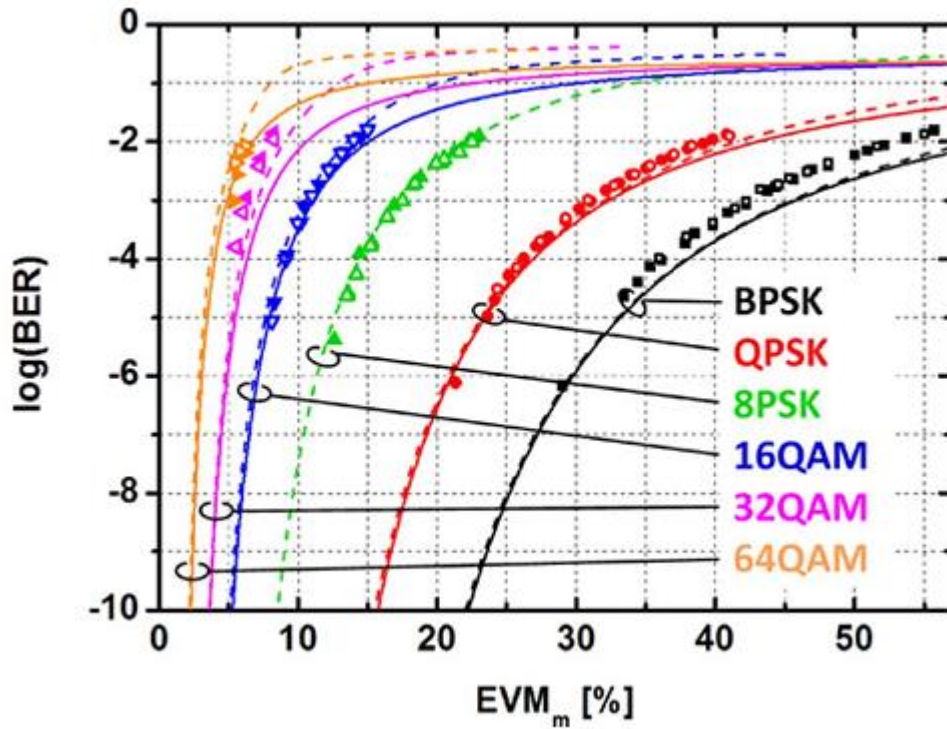


Figura 39 - Relação entre BER e EVM, medições (símbolos), simulações (tracejado), teórico (linhas) [38]